



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV FYZIKÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PHYSICAL ENGINEERING

SLEDOVACÍ MIKROPOSUVNÝ SYSTÉM

MICROPOSITIONING TRACKING SYSTEM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Svoboda

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Jákl, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav fyzikálního inženýrství
Student: **Tomáš Svoboda**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Petr Jákl, Ph.D.**
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Sledovací mikroposuvný systém

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Tématem práce je návrh, konstrukce, realizace a charakterizace zařízení pro sledování živých myších modelů v reálném čase. Zařízení bude využito v experimentech využívajících endoskop s vláknovou sondou. Při výzkumu funkce mozkových tkání endoskopickými metodami in vivo je nezbytné, aby organismus se zavedenou sondou v reálném čase sledovat a udržovat vzdálenost a vzájemnou orientaci modelu a endoskopu konstantní, aby nedocházelo k mechanickému pnutí a torzi multimódového vlákna. Nezbytný rozsah pohybu platformy bude v rozsahu přibližně 500x500 mm a konstrukce platformy musí mít světlou výšku minimálně 200 mm. Zařízení bude založené na konstrukci Gantryho můstku s krokovými či DC motorky. Konstrukce se bude skládat z komerčně dostupných i vlastních dílů, přičemž významná část zařízení bude vytvořena 3D tiskem. Ovládání pohybu platformy bude řízeno pomocí software v LabVIEW či Pythonu.

Cíle bakalářské práce:

1. Provést rešerši mikroposuvných zařízení a zvolit vhodné motorky a způsob jejich řízení.
2. Navrhnout sestavu z komerčně dostupných dílů i elementů dle vlastního návrhu, přičemž část sestavy bude vyrobena pomocí technologie 3D tisku.
3. Sestavit aparaturu, osadit elektromechanickou část a připravit základní softwarové řízení pohybu.
4. Charakterizovat zařízení, jeho rozsah, rychlost a přesnost pohybu.

Seznam doporučené literatury:

WEISS, Benjamin M. Closed-Loop Control of a 3 D Printer Gantry. Seattle, 2014. Master's thesis. University of Washington. Vedoucí práce Duane Storti.

SCHNEIDEREIT, Dominik, Larissa KRAUS, Jochen C. MEIER, Oliver FRIEDRICH a Daniel F. GILBERT. Step-by-step guide to building an inexpensive 3D printed motorized positioning stage for automated high-content screening microscopy. Biosensors and Bioelectronics. 2017, 92, 472-481. ISSN 09565663. Dostupné z: doi:10.1016/j.bios.2016.10.078

ROSADO, Luís, João OLIVEIRA, Maria João M. VASCONCELOS, José M. Correia da COSTA, Dirk ELIAS a Jaime S. CARDOSO. μ SmartScope: 3D-printed Smartphone Microscope with Motorized Automated Stage. In: Proceedings of the 10th International Joint Conference on Biomedical Engineering Systems and Technologies. SCITEPRESS - Science and Technology Publications, 2017, 2017, s. 38-48. ISBN 978-989-758-216-5. Dostupné z: doi:10.5220/0006155800380048.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

prof. RNDr. Tomáš Šíkola, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem a konstrukcí mikroposuvného zařízení, které bude za pomoci kamery sledovat pohyb robotické myši ve vymezeném prostoru. Hlavním úkolem bude sestavit pohyblivou platformu, jejímž cílem bude nacházet se v neustálém kontaktu s robotem pod ní a kopírovat jeho 2D trajektorii. Zařízení bude v budoucnu aplikováno na živou myš pro *in vivo* experimenty holografické endoskopie.

Klíčová slova

Mikroposuvný sledovací systém, gantry můstek, Arduino, LabVIEW

ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with the design and construction of a micro positioning device that will monitor the movement of a robotic mouse in a defined space with the help of a camera. The main task will be to assemble a moving platform, the aim of which will be to be in constant contact with the robot below it and to copy its 2D trajectory. The device will then be applied to a live mouse for *in vivo* holographic endoscopy experiments.

Key words

Micropositioning tracking system, gantry bridge, Arudino, LabVIEW

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Citace elektronického zdroje:

SVOBODA, Tomáš. *Sledovací mikroposuvný systém* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-21]. 60 s. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132563>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav fyzikálního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Petr Jákl, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem *bakalářskou* práci na téma **Mikroposuvný sledovací systém** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....
Datum

.....
Jméno a příjmení

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval mému vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Petru Jáklovi, Ph.D. za odborné vedení, ochotu a přínosné rady. Také bych rád poděkoval týmu Gate2μ, včetně MVDr. Petře Ondráčkové, Ph.D. za propůjčení robotického myšáka na experimentální část. Děkuji taktéž mé rodině, přítelkyni a blízkým přátelům za trpělivost a podporu.

OBSAH

ÚVOD	13
1 Přehled mikroposuvných systémů	14
1.1 3D tiskárny	14
1.1.1 Determinace pohybů	15
1.1.2 Řídící deska a firmware	16
1.2 CNC frézka	17
1.2.1 Projekt Root CNC	17
1.2.2 Root 3 CNC	17
2 Přehled použitých součástí pro sestavení sledovacího zařízení	20
2.1 Statické součásti soustavy	21
2.1.1 Optický stůl	21
2.1.2 Podpěrné tyče	21
2.1.3 Kovové platformy	21
2.2 Lineární vedení v osách X a Y	22
2.3 Motory	23
2.3.1 DC motory	23
2.3.2 Krokové motory	24
2.3.3 Přepoččet kroků na posuvy v jednotlivých osách	25
2.4 Arduino UNO	25
2.5 CNC shield s budiči	26
2.6 Držáky tyčí	28
2.7 Pojezdy	29
2.8 Pozorovací vozík	30
2.9 Ozubený hřeben	31
2.10 Soustava s řemenem	33
2.11 Kamera	34
3 Realizace 3D tisku	35
3.1 PET-G	35
3.2 ABS	35
3.3 Zkušební tisk	36
3.4 Finální sestava	37
4 Detekce změny pohybu	41
4.1 Program pro Arduino	42
4.2 Program v Labview	43
4.2.1 První návrh	43
4.2.2 Finální návrh	44
4.3 Experiment s robotickou myší	45
4.3.1 Zaměření bodu z určité vzdálenosti	46
4.3.2 Sledování robotické myši ve vymezeném prostoru	48
5 Zhodnocení a diskuse	52

6	Závěr.....	53
7	Seznam použitých zdrojů.....	54
8	Seznam obrázků.....	57
9	Seznam použitých zkratk.....	58
10	Seznam tabulek.....	59
11	Seznam příloh.....	60

ÚVOD

Při pozorování laboratorní pokusné myši v holografické endoskopii metodou *in vivo* se zavádí vláknová sonda do temene hlavy, pomocí které se přenáší obraz z mozku pokusného zvířete přes endoskop do počítače. Myš se ve svém vymezeném prostoru volně pohybuje, tím se vlákno deformuje a způsobuje nepřesný přenos informace. Problémem může být také překročení mezního stavu pružnosti při extrémním silovém namáhání nebo se výrazně zkrátí životnost v důsledku cyklické deformace. V mé práci se budu zabývat návrhem zařízení, které bude pomocí kamery sledovat pohyb robotické myši napodobující chování živé. Kamera udržuje myš ve středu jejího zorného pole. Deformace vlákna budou relativně malé a nežádoucí jevy se minimalizují.

V první části je vypracovaná rešerše se zhodnocením známých mikroposuvných systémů. Další část práce se zabývá konstrukčním řešením požadavků na pozorovací sestavu z velké části složenou z dílů tištěných na 3D tiskárně metodou FDM. Následně rozeberu program na sledování objektu kamerou a v poslední kapitole charakterizují zařízení na základě dat z experimentální části.

1 Přehled mikroposuvných systémů

Mikroposuvné mechanismy mohou být manuální nebo založené na použití piezoelektrických elementů, stejnosměrných motorů či krokových motorů. Vybrali jsme řešení s krokovými motory, protože nevyžadují zpětnou vazbu o pohybu a mají velký rozsah pohybů.

Krokové motory se pohybují v diskrétních krocích a vzniká tedy pohyb, který je velice trhavý a rotace není perfektně hladká. Čím jsou rychlosti menší, tím je pohyb méně hladší kvůli relativně dlouhé krokové vzdálenosti. Mikroposuvná zařízení potřebují pracovat i v malých rychlostech a aby byla zachována plynulost, je nutné ji dosáhnout pomocí tzv. metody pulse-width modulation (PWM). Díky ní můžeme modulovat šířku pulzu napětí k řízení proudu, který vstupuje do vinutí motoru a dosáhnout plynulejšího chodu celého zařízení.[1]

V následujících kapitolách rozeberu zařízení, která se charakterizují jako mikroposuvná a byla mou inspirací při návrhu pozorovací sestavy.

1.1 3D tiskárny

Nedílnou složkou tzv. rychlého prototypování ve vývoji je 3D tisk. Umožňuje nám v relativně krátkém čase přenést digitální návrh součásti ve skutečný objekt. V dnešní době existuje několik technologií zabývajících se 3D tiskem:

- Fused deposition modeling (FDM)
- Stereolithography (SLA)
- Digital Light Processing (DLP)
- Selective Laser Sintering (SLS)
- Selective laser melting (SLM)
- Laminated object manufacturing (LOM)
- Digital Beam Melting (EBM)[33]

Technologie se navzájem liší jak v kvalitě provedení tisku s ohledem na použitý materiál, tak v pořizovací ceně zařízení. Mezi nejpoužívanější materiály patří různé druhy plastů, a to v přední řadě nylon, ABS, PLA a PET. V praxi se můžeme setkat i s kovovými materiály, které najdou své využití například v automobilovém průmyslu při výrobě těhlic a výjimkou není ani tisk zlata, stříbra nebo titanu.

V mé práci se zaměřím na tisk pomocí FDM, jelikož i mé díly sledovacího zařízení budou touto cestou vyhotoveny. Jako zástupce FDM technologie jsem si vybral tiskárnu od společnosti Creality, Ender 3.



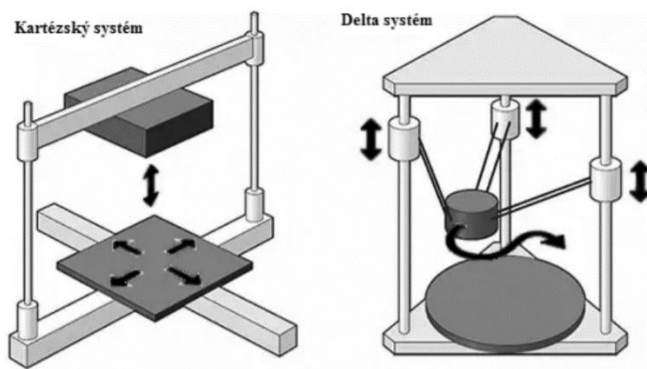
Obr. 1 Tiskárna Ender 3

Parametry:

- Pracovní objem - 220x220x250 mm
- Motory – Creality 42-34(3x)/40-42 (1x)
- Přesnost - $\pm 0,1$ mm
- Počet tiskových hlav - 1
- Vnější rozměry – 440x410x465 mm
- Váha – 8 kg

1.1.1 Determinace pohybů

Materiál, v mém případě PLA, je pomocí krokového motoru přiváděn do extruderu, kde se struna o průměru 1,75 mm taví při stálé teplotě 200 °C. Natavená struna vstupuje do trysky s průměrem 0,4 mm a nanáší se na předehřátou platformu na přibližně 50 °C. Pohyb trysky vůči platformě určí výsledný tvar výrobku.



Obr. 2 Rozdělení tiskáren podle souřadnicového systému[15]

Řízení probíhá ve třech osách (X,Y,Z) podle kartézského souřadného systému (obr.2). Tento standardní systém souřadnic popisuje bod v trojrozměrném prostoru, který je určen vzdáleností od jeho počátku vůči těmto třem na sobě kolmým os. Osa X je řízena přes řemen a kladku (viz. obr. 2 a 3) a stejné konstrukce bylo využito i u osy Y. Z-ovou osu ovládá elektromotor přes závitovou trapézovou tyč, která se nachází pouze na jedné straně konstrukce. Vedení v osách je zabezpečeno koly odvalujícími se po stranách konstrukčních částí. Aby docházelo k plynulému pohybu, musí se provést korekce utažením vodícího řemene a vycentrování ozubeného kola na hřídeli krokového motoru v osách X a Y. U osy Z se provádí dotažení odvalujícího kola.



Obr. 3 Napínání řemene přes kladku (osa X)[7]

1.1.2 Řídící deska a firmware

Tiskárna je vybavena základní deskou Creality3D V 1.1.4. Umožňuje řízení čtyř krokových motorů, dvou chladících ventilátorů (extruderu, tiskového filamentu), nahřívání tiskové plochy a extruderu (k nim příslušných termistorů) a vývody na LCD displej. Vše ovládáno skrz firmware Marlin, který je volně dostupným programem pro 3D tiskárny.



Obr. 4 Creality 3D V1.1.4

1.2 CNC frézka

1.2.1 Projekt Root CNC

Projekt vznikl za účelem vytvořit rozšiřitelnou verzi CNC frézky obrábějící hliníkové polotovary. Dbá se při tom na použití různých 3D tištěných dílů, možnosti přizpůsobení velikosti zařízení, jednoduchost a co nejnižší cenu v závislosti na splnění dalších dílčích požadavků jako např. přesnost.

1.2.2 Root 3 CNC

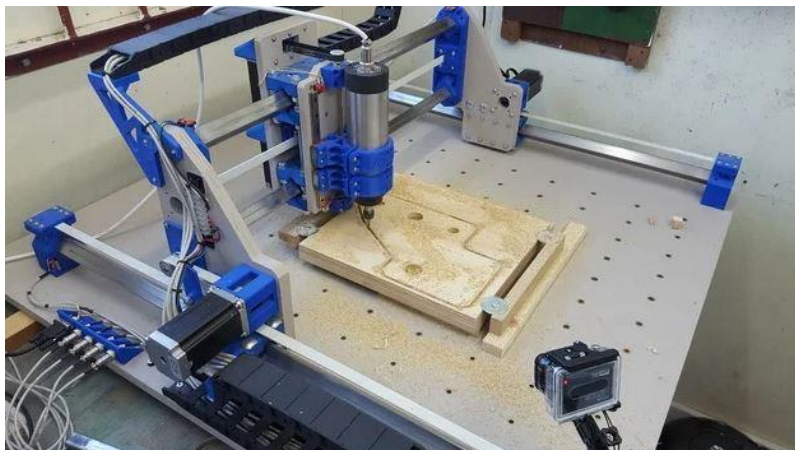
Jako dalšího zástupce mikroposuvných zařízení jsem vybral CNC frézku Root 3. Využívá konstrukce gantry můstku a spousta dílů je tvořena technologií 3D tisku. Modely jednotlivých dílů jsou volně dostupné i s návodem. Root 3 je druhým nástupcem v této řadě CNC přístrojů, který představuje doladěné nedostatky předchozích dvou verzí.

Cíle projektu Root 3 byly:

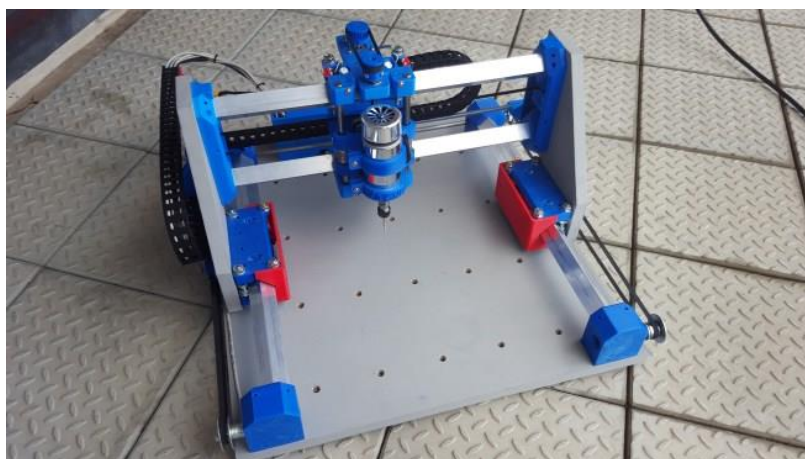
- Zvýšení konfigurovatelnosti
- Zvýšení tuhosti
- Zvýšení flexibility
- Zlepšení přesnosti
- Snížení hmotnosti některých dílů

K pohonu hlavních os slouží motory NEMA-23, ale lze je nahradit i NEMA-17 v závislosti na konfiguraci uživatele. Přesnost byla zvýšena tím, že se odstranila druhá smyčka pásu na ose Y při současném zachování obou stran portálu stále spojených dohromady. Ta na minulém modelu vytvářela chyby v pohybech kvůli větším zátěžím a bylo tedy velice obtížné zachovat stejný pohyb na obou smyčkách.

Osy X a Y mají stejně navržené způsoby pohybu, který jim zajišťuje vodící šroub. V ose Z se využilo lineárního vedení.



Obr. 5 Root 3 CNC[16]



Obr. 6 Root 2 CNC[17]

Z tabulky Tab. 1 na další straně je patrné, že největším přínosem bylo zvětšení pracovního prostoru z 500 x 500 mm na 1000 x 1000 mm což v důsledku činí až čtyřnásobek původní plochy. Informace o poloze je zajištěna dorazy na obou osách.

V dalších fázích vývoje projektu následoval Root 3 lite založený na principech Root 3. Oproti jeho předchůdcům se rameno pohybuje po 20 mm profilech a je zaměřen na lehké pracovní zátěže. Mohou ho pohánět pouze motory NEMA 17. Nejnovější verzi vydanou 19.6. 2020 je Root 4, která už má také svou „lite“ verzi. Root 4 se vyznačuje vyšší pevností celé konstrukce a zvětšeným pracovním prostorem až na 1500 x 1500 mm. 55[18]

Název	Root 2	Root 3
Datum uvěřejnění	06.03.2016	01.11.2016
Pohybový systém	Řemeny/ vodící šrouby	Řemeny/ vodící šrouby
Druh pohybu na osách	XY = Root Motion	XY = Root Motion
	Z = Lineární ložiska	Z = Lineární ložiska
souřadnice	XYZ	XYZ
Podporovaný software	Marlin	Marlin
	GRBL	GRBL
	MACH3	MACH3
	MACH4	MACH4
	LINUXCNC	LINUXCNC
Configurace	Frézka	Frézka
	Řezací nůž	Řezací nůž
	PCB frézka	PCB frézka Řezání plasmou
Materiály	Měkká i tvrdší dřeva	Měkký i tvrdší hliník/dřevo
	Měkké materiály	Měkké materiály
Podpora vřetena	DC	DC
	Trim router	Trim router
	VFD vřeteno 65 – 85mm	VFD vřeteno 65 – 85mm
Dorazy	Ano	Ano
Z - sonda	Ano	Ano
Typ motoru	NEMA 17	NEMA 17
		NEMA 23
Maximální pracovní prostor	500×500	1000×1000
Pojezd osy Z	70mm	120mm

Tab. 1 Srovnání verzí Root 2 a Root 3[18]

2 Přehled použitých součástí pro sestavení sledovacího zařízení

Při výběru jednotlivých součástí jsem se snažil, aby jednotlivé díly plnily svou funkci a nebyly v sestavě nadbytečné. U některých dílů byla zvolena výroba 3D tiskem metodou FDM a tím se zvýšila flexibilita konstrukce, zkrátila doba cyklu návrh-výroba a snížila cena celkového zařízení. K tomuto řešení se přistoupilo jen v případě dílů, které nejsou výrazně namáhány nebo jsou komerčně dostupné a vyhovují představám konečného návrhu. Následující Tab. 2 zobrazuje souhrn všech hlavních dílů.

Součást	popis	počet kusů
Mechanická část		
Optický stůl	-	1
P14	válcová část podpěry	4
PB1	základna podpěrné tyče	4
Thorlabs MB1590/M	hliníková platforma	2
LM12UU	lineární ložisko	6
NEMA 17 -0,28 Nm	bipolární krokový motor	1
NEMA 17 -0,44 Nm	bipolární krokový motor	1
ESSC1 Vodicí tyč - 650mm	hladká tyč pro lineární vedení	2
ESSC1 Vodicí tyč - 750mm	hladká tyč pro lineární vedení	2
Kladka GT2	obsahuje vnitřní ložisko	1
Řemenice GT2	20 zubů	2
Řemen GT2	délka - 2 m	1
Elektronika		
A4tech PK-910H	web kamera	1
CNC shield	nástavba pro krokové motory	1
Arduino UNO	programovatelná deska	1
A4988	budič krokového motoru	2
Vodiče	spojení CNC shieldu s motory	2
Zdroj	12 V	1
Tištěné díly		
Pojezd 1	-	1
Pojezd 2	-	1
Držák tyče	-	4
Jistící díl	-	4
Vozík	-	1
Objímka pro kameru	-	1

Tab. 2 Seznam použitých dílů

2.1 Statické součásti soustavy

2.1.1 Optický stůl

Podstatným prvkem je odpružený optický stůl B75120L od firmy Thorlabs s deskou o rozměrech 750 x 1200 x 60. Stůl disponuje bočními políčkami. Je určen především pro menší optické soustavy a byl proto ideální i pro sestavu typu gantry s plánovanými rozměry 500x500. Parametry rozložení se tak mohly ještě v budoucnu upravit a prostor na optickém stole tudíž nebyl nijak omezující. Horní a spodní pláště z nerezové oceli mají tloušťku 5 mm. Stůl je osazen dírami se závity o průměru 6 mm s roztečí 25 mm po celé ploše stolu. Deska obsahuje voštinovou strukturu a dále je tlumení podporováno vyladěnými nebo širokopásmovými tlumiči na stlačený vzduch.[8]

Tlumení vibrací stolu přispívá ke zlepšeným podmínkám při pozorování preparátů optickými soustavami. Vibrace vznikají z mnoha důvodů. Například čistě z akustického hlediska vybudíme frekvenci o hodnotě 100-10 000 Hz s amplitudou od 10^{-3} - 10^{-1} mm nebo v závislosti na výšce umístění v budově může vzniknout amplituda až 3 mm.

V mé bakalářské práci vibraci kontrolovat nepotřebuji, ale v rámci pokračování dalších fází projektu je tato otázka poměrně důležitá.[9]

2.1.2 Podpěrné tyče

Výška, ve které se musí platforma nacházet, není předem určena, ale vychází nepřímou z požadavků na pozorování. Pokud by se platforma nad myš nacházela příliš nízko, kamera by ji nestíhala sledovat a myš by se ztratila z jejího dosahu. Navíc by byl subjekt ovlivněn zvukem motorů nebo přímo samotnou přítomností sledovacího vozíku. Stanovena byla na hodnotu 360 mm.

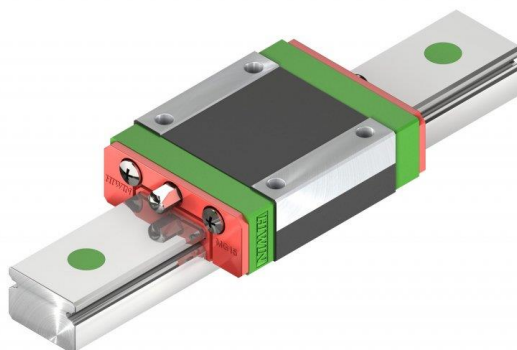
Podpěra se skládá ze dvou kovových částí. První částí je základna sloupku PB1 o šířce 10 mm smontovaná se sloupkem P14 vysoký přibližně 350 mm s průměrem 38 mm. Čtyři takto sestavené díly připevněny k desce optického stolu vymezují prostor 525x850. [10]

2.1.3 Kovové platformy

Na kovových podpěrách se nacházejí hliníkové platformy Thorlabs MB1590/M s parametry 150 x 900 x 12,7. Podobně jako u optického stolu mají i platformy díry se závity s roztečí 25 mm. Aby se daly platformy smontovat s podpěrami, musely se vyřezat díry na obou koncích platform ve středu jejich šířek. Výsledkem je stabilní platforma, jejíž těžiště leží ve stejné rovině s těžišti podpěr.[11]

2.2 Lineární vedení v osách X a Y

Lineární pohyb po osách lze navrhnout několika způsoby. Při řešení mého problému jsem se inspiroval u 3D tiskáren. Jako alternativní, komerčně dostupnou možností bylo lineární vedení HIWIN, které obsahuje broušenou kolejnici s vozíkem posouvajícím se na lineárním ložisku.



Obr. 7 Lineární vedení HIWIN [19]

3D tiskárny využívají k lineárnímu pohybu hladké tyče s lineárními ložisky. Rozhodl jsem se je aplikovat na obě osy ležící v horizontální rovině nad optickým stolem. Určující faktory pro průměr tyčí byla váha sledovacího vozíku s kamerou, která nebyla dopředu známa. Proto byl na základě domluvy vybrán průměr 12 mm a až po objasnění skutečné váhy zátěže mohl proběhnout kontrolní výpočet pro maximální napětí v ohybu s parametry:

$$\begin{aligned} Re(\text{mez kluzu tyče}) &= 355 \text{ MPa} \\ l(\text{délka tyče}) &= 650 \text{ mm} \\ m(\text{vozík s kamerou}) &= 200 \text{ g} \\ d &= 12 \text{ mm} \end{aligned}$$

Maximální ohybový moment se nachází v polovině délky osy Y a je distribuována na obě tyče rovnoměrně, proto je jeho hodnota:

$$M_{y(\max)} = \frac{m \cdot g \cdot l}{8} = 0,159 \text{ Nm} \quad (2.1)$$

Modul pružnosti v ohybu:

$$W_o = \frac{\pi \cdot d^4}{64} = 1,018 \cdot 10^{-9} \text{ m}^4 \quad (2.2)$$

Nominální napětí v místě maximálního ohybu:

$$\sigma_0 = \frac{M_{y(\max)}}{W_o} = 156,2 \text{ MPa} \quad (2.3)$$

Bezpečnost v tomto případě činí:

$$k = \frac{Re}{\sigma_0} = 2,27 \quad (2.4)$$

Výsledkem bylo potvrzení dobře zvoleného průměru tyčí na ose Y. Stejná iterace proběhla i u osy X, kde podle rovnice (2.4), v tomto případě s délkou tyče 750 mm a zátěže 640 g vyšla bezpečnost na 1,2.

Lineární ložiska LM12UU zajišťují hladký chod po obou osách. Pro dokonalejší a plynulejší přesun po tyči byl před nasunutím aplikován mazací prostředek BTS, který eliminuje nedokonalosti tyče.

Povrchy tyčí nebyly v adekvátním stavu pro použití. Navíc hrany byly velice ostré a při vkládání do ložisek byl mohlo dojít k jejich poškození. Za pomoci technika na ústavu musely být ještě před uvedením do provozu řádně očištěny. Hranám přibylo zkosení $1 \times 45^\circ$.



Obr. 8 ložisko LM12UU

2.3 Motory

Při výběru pohonného systému bylo důležité, aby se zachoval charakter zařízení. U mikroposuvných zařízení je důležitá přesnost pohybu a tím i jeho kontrola skrz software. Nejširší zastoupení mají právě krokové motory, a to jak ty unipolární, tak i bipolární. Další alternativou mohl být i DC neboli stejnosměrný motor v kombinaci s enkodérem.

2.3.1 DC motory

Práce DC motoru je založená na vytváření sil na vodiči, ve kterém protéká proud v magnetickém poli. Cívka vytváří dva vodiče s protékajícím proudem v opačných směrech. Dojde k vytvoření sil s opačnou orientací a následnému otočení motoru. Princip funguje na vzorci:

$$\vec{F} = \vec{B} \times \vec{l} \cdot I \quad [N] \quad (2.5)$$

Kde B označuje magnetickou indukci, l délku drátu a I procházející proud. Na rotoru se nachází vinutí kotvy připojené ke komutátoru. Statorem jsou dva permanentní magnety nebo budící vinutí. Pomocí kartáčů se přivádí energie.

2.3.2 Krokové motory

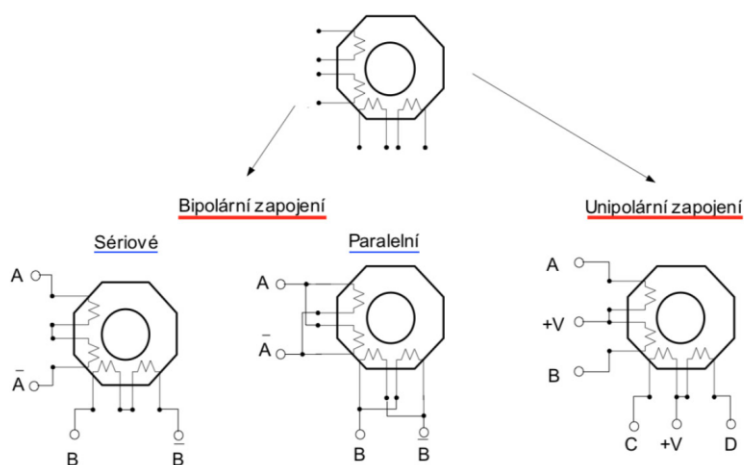
Krokové motory jsou motory synchronní s buzením permanentními magnety. Tyto motory jsou nejpoužívanějšími ve světě 3D tisku a má to své důvody. Slouží jako jistota velice přesných posuvů na osách, kde u těch levnějších variant je 1 krok ekvivalentní s otočením o $1,8^\circ$. U dražších motorů se dostáváme až na hodnotu $0,9^\circ$ na krok. Výrobce vždy uvádí počet kroků na celou otáčku a díky tomu si můžeme sami přepočítat o kolik se nám motor pootočí podle vztahu:

$$\alpha = \frac{360}{n} [^\circ] \quad (2.6)$$

n - počet kroků na otáčku

Při programování se používají budiče krokových motorů, které umožňují snadné ovládání. Stačí zadat směr, počet a rychlost jednotlivých kroků a dosáhneme požadovaných efektů. Nevýhoda tohoto řízení je, že nemáme zpětnou vazbu o poloze, ale v mnoha případech si vystačíme i bez této informace a ani mé zařízení tuto informaci nebude zpětně dostávat.

Rozlišujeme motory bipolární a unipolární. U unipolárních prochází proud pouze v jednom směru. Dosahuje menší spotřeby energie na úkor relativně nízkého točivého momentu. Při bipolárním řízení prochází proud protilehlými cívkami. Ty mají při zapojení vždy navzájem opačné magnetické pole. Energie, která se spotřebovává, je vyšší než u unipolárního řízení, ale dosahujeme větších momentů a tím i stabilnějšího chodu motoru. [23]



Obr. 9 Schéma zapojení vodičů na cívky v krokových motorech[22]

Na Obr. 9 je popsán způsob zapojení vodičů k cívkám. Motory NEMA 17 jsou sériové bipolární motory se čtyřmi barevně označenými připojovacími dráty. To znamená, že dva dráty dodávají proud vždy dvěma cívkám v sérii. Modrý s červeným uzavírají první obvod. Zelený s černým poté ten druhý. Před použitím je lepší vždy zkontrolovat, jestli je určení obvodů určené výrobcem správné.[30]

Pro pastorek je určen silnější motor NEMA 17 s přídržným momentem 0,44 Nm kvůli překonávání obvodových sil na ozubeném hřebeni. Menší ze dvou motorů jsem umístil na pohon řemene přes řemenici. Tam jsou síly oproti hřebeni minimální, a proto jsem si mohl dovolit snížit moment až na 0,28 Nm.

2.3.3 Přepočít kroků na posuvy v jednotlivých osách

Oba motory podle rovnice (2.6) udělají 200 kroků za jedno celé otočení. V ose X je transformace pohybu z rotačního na translační umožněna pastorkem odvalujícím se po hřebeni s modulem 2. Na ose Y se nachází řemenice. Podle následujícího vzorce vypočteme délku jedno kroku na každé ose:

$$l_{KR} = \frac{\pi \cdot d}{n} [mm] \quad (2.7)$$

Malé d označuje roztečný průměr u pastorku nebo vnější průměr přes zuby řemenice, n počet kroků na otáčku. Protože máme motory řízené pomocí mikrokroků, nemůžeme vzít pouze jejich hodnotu danou výrobcem. U osy X dělíme kroky šestnácti, u osy Y jen 8. Z toho nám plyne, že posuv v případě pastorku vychází přibližně na 31 μm na jeden krok. U řemenice se jedná přibližně o hodnotu 19 μm . Princip mikrokrokování je vysvětlen v dalších kapitolách.

2.4 Arduino UNO

Mikrokontroler Arduino uno je vhodným řešením pro menší projekty řízené počítačově. Deska je založena na jednotce ATmega328 a disponuje čtrnácti digitálními piny. Ty je možné použít jak na vstup, tak i výstup z desky. Zařízení je napájeno od 7-12 V a samo při práci využívá 5 V.



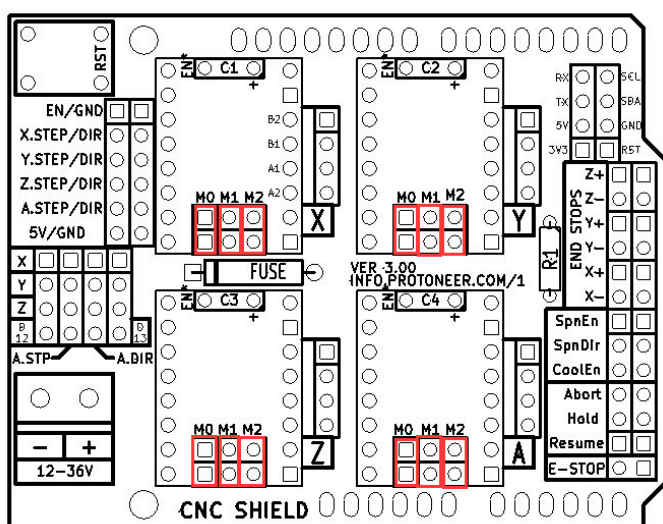
Obr. 10 Vývojový kit Arduino UNO[24]

Kapacita paměti není nijak převratná a při složitějších programech je lepší využít například Arduino mega 2560 s výrazně větší pamětí a větším počtem pinů na desce. Flash paměť má velikost 32 KB, SRAM 2 KB a EEPROM 1 KB. Každá paměť má v zařízení svůj účel. Na Flash nahráváme program, který chceme na kontroléru používat. Společně s pamětí EEPROM se nevymaže, pokud je Arduino odpojeno nebo bylo restartováno. Tato paměť většinou ještě obsahuje tzv. bootloader, který realizuje spuštění nahrávaného programu. EEPROM má stejnou funkci jako Flash paměť, ale zvládne zápis pouze o 8 bitech. Binární zápis o více bitech se dá v programu rozdělit po 8 bitech. Číslo se tak uloží po skupinách a zápis je umožněn do kapacity 1 KB. SRAM obstarává ukládání hodnot při spuštění programu. Zde je nutné podotknout, že SRAM je opravdu hodně malá. Musí se tedy dbát na to, aby zpracovávané proměnné nebyly zbytečně náročné na paměť. Krystal běží na frekvenci 16 MHz. [25]

2.5 CNC shield s budiči

Řízení krokových motorů přes tranzistory je v dnešní době už považováno za zastaralé a příliš nepraktické řešení. Tyto diskrétní součástky by zabíraly spoustu místa na desce plošného spoje. Integrované drivery neřeší jenom problém velikostní, ale usnadňují práci přímo programátorům. Ti se nemusí příliš zajímat o způsob fungování motoru a pouhým určením směrů, počtu kroků, popřípadě způsobu mikrokrokování ušetří spoustu práce s realizací kontroléru.

Pro mou bakalářskou práci jsem se rozhodl pracovat s CNC shieldem a drivery (budiče) A4988. Jak napovídá samotný název produktu, CNC shieldy aplikují při počítačem řízených strojích. Své uplatnění nacházejí především ve stolových frézách, kde se starají o chod ve všech osách.



Obr. 11 Rozložení pinů na CNC shieldu[21]

Na obr. 11 můžeme vidět schéma CNC shieldu a rozložení pinů na desce. Shield dokáže ovládat tři samostatně řízené motory a jeden motor v sérii s jiným motorem. V levé části se

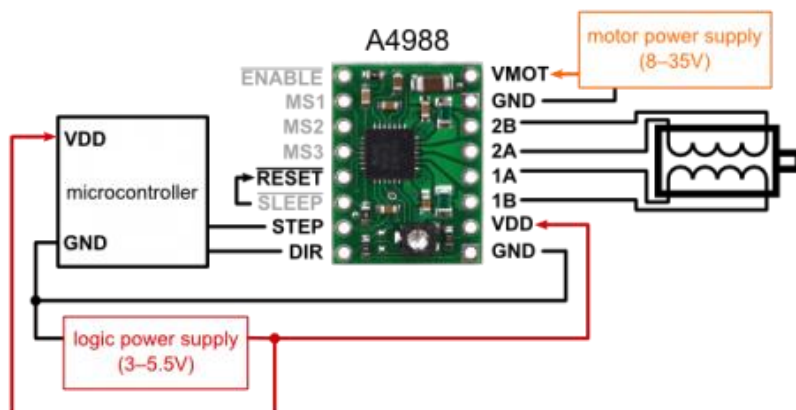
nacházejí piny posílající informace o směru otáčení a počtu kroků. V pravé části deska nabízí možnost připojení externích koncových zarážek informující o poloze motoru. Červeně označené jsou piny pro mikrokrokování. Realizace probíhá za pomoci zmenšených vodičů pro 2 piny. Při spojení dvou pinů nad sebou redukuje velikost kroků podle

MS0	MS1	MS2	Mikrokrokové rozlišení
L	L	L	Celý krok
H	L	L	Poloviční krok
L	H	L	Čtvrtinový krok
H	H	L	Osminový krok
H	H	H	Šestnáctinový krok

Tab. 3 Způsoby mikrokrokování

Sloupce M0, M1, M2 omezují možnosti na 5 variant. Pokud nezapojíme ani jeden sloupec, dostaneme celý krok. Když sepneme první sloupec, operujeme s polovičním krokem. Dokážeme se tak dostat až na šestnáctinu celého kroku, kdy se celý chod motoru vyhladí a zmizí trhavé pohyby.

Součástka, která nám dovoluje řídit krokové motory tímto způsobem se nazývá budič krokového motoru neboli driver. A4988 je komerčně dostupnou variantou budiče. Na CNC shiled je připojen šestnácti piny. Napájení jeho vnitřního okruhu se pohybuje mezi 3,7 – 5 V. Motor napájí 8 – 24 V.



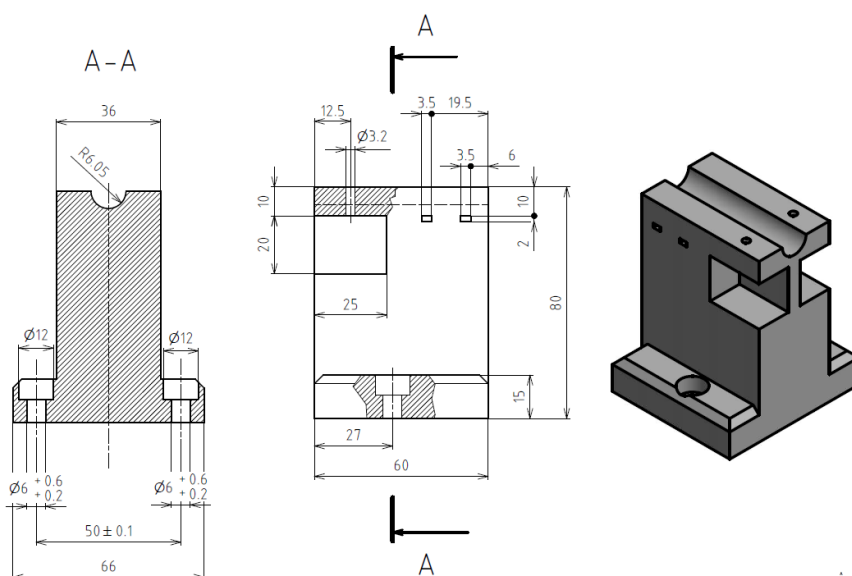
Obr. 12 zapojení driveru A4988[21]

Důležitou vlastností budiče je kontrola proudu vtékajícího skrz cívky motoru. Regulace je prováděna rotační součástkou na vrchní straně driveru sloužící jako potenciometr. Jelikož nemůžeme zjistit přímo proud protékající do budiče, postupujeme podle vzorce:

$$U_{REF} = 8 \cdot I_{MAX} \cdot R_{CS} \quad [V] \quad (2.8)$$

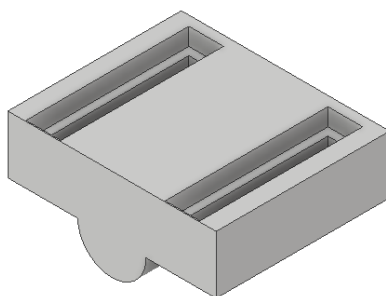
Kde U_{REF} je napětí, které zjišťujeme na voltmetru, I_{MAX} maximální proud vpuštěný do cívek motoru a R_{CS} proudem snímaný odpor jehož hodnota je $0,05 \Omega$. [26] Přetížení motoru nadměrným proudem by vedlo k jeho postupnému vyhoření. Problémem může být i špatné zapojování motorů do CNC shieldu. Ten nastane, pokud s motory operujeme při zapojení v síti. Logické obvody budiče jsou vyzkratováním přetíženy a navržené součástky nevydrží. Do rovnice (2.8) jsem dosadil maximální možné proudy zjištěné z katalogů pro motory. Pro motor s přídržným momentem $0,28 \text{ Nm}$ je limitním proudem $1,3 \text{ A}$. U $0,44 \text{ Nm}$ hodnota činí $1,7 \text{ A}$. Referenční napětí vyšla $0,52 \text{ V}$ a $0,68 \text{ V}$.

2.6 Držáky tyčí



Obr. 13 Rozměry držáku tyčí s modelem

Slouží k vyvýšení tyčí na platformách pro správnou pozici pastorku vůči ozubenému hřebeni. Nacházejí se po stranách platformy a k zajištění axiálního posunu tyčí mají navíc na své vrchní straně přišroubovaný samostatný jistící díl. Tento způsob je vhodný při potřebě změnit v budoucnu délku tyčí pro zvětšení či zmenšení posuvové oblasti. Díl se dokáže přizpůsobit umístění tyče v intervalu 22 mm . Dodatečné pojištění proti otáčení nebo v krajním

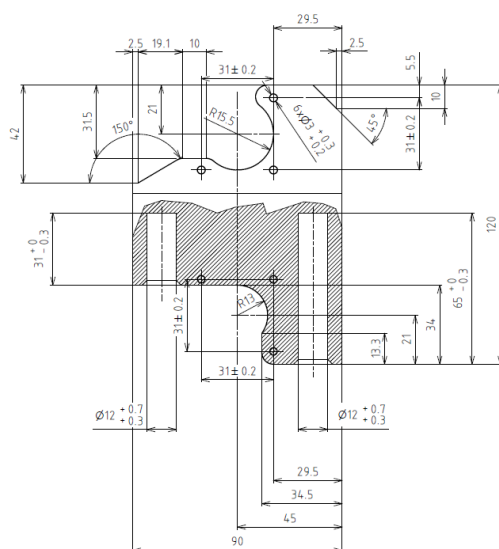


Obr. 14 Jistící díl

případě vyskočení tyčí z válcovité drážky zabezpečeno párem stahovacích pásek na každém díle.

Díly jsou v místě drážky vytisknuty s minimální vůlí, aby došlo k správnému tvarovému překrytí. Deviační tolerance jsem zahrnul pouze pro díry se šrouby, kvůli roztažnosti plastového materiálu při tisku.

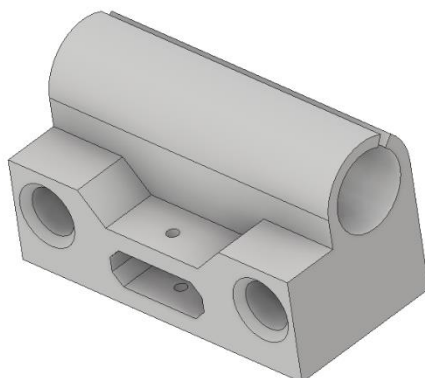
2.7 Pojezdy



Obr. 15 Rozměry pojezdu 1 s modelem

Pojezd č. 1 nese oba krokové motory. Každý z nich je připevněný na třech šroubech M3 s maticemi. Středem dílu prochází tyč s průměrem 12 mm a pro hladký pohyb je osazen párem ložisek. Vkládají se rozevřením montážní drážky do díry s menším přesahem. Správné uložení ložisek nastává zarovnáním jejich bočních stran se stranami pojezdu. Jedná se o poměrně zatížený prvek mechanismu. Tloušťka spodní stěny je proto navržena až na 19,5 mm. Stejně jako protilehlý díl-pojezd č. 2 se stará o vedení dvou rovnoběžných tyčí osy Y. Tyče jsou v obou dílech na volno s minimální axiální vůlí. Toleranční pole děr jsou 0,4 mm, kde nejvhodnějším řešením je hodnota o průměru 12,5 mm. Při této velikosti nedochází k výraznějším relativním pohybům dílů. Po provedených experimentech pohybů na osách se ukázalo, že jsou navržené díly poměrně synchronizovány a nedochází k výraznější oscilaci. Amplituda kmitů vyvolaná pohybem je okem nepozorovatelná.

Dříve zmíněný pojezd č. 2 je méně namáhaným dílem celé sestavy. Vkládání ložisek probíhá stejně jako v předchozím případě. Uvnitř součásti se nachází průchozí otvor pro kladku GT2 otáčející se na šroubu M3.

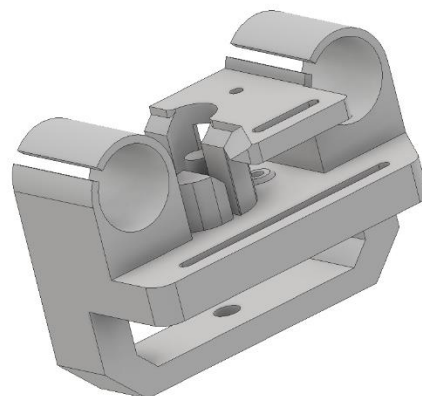
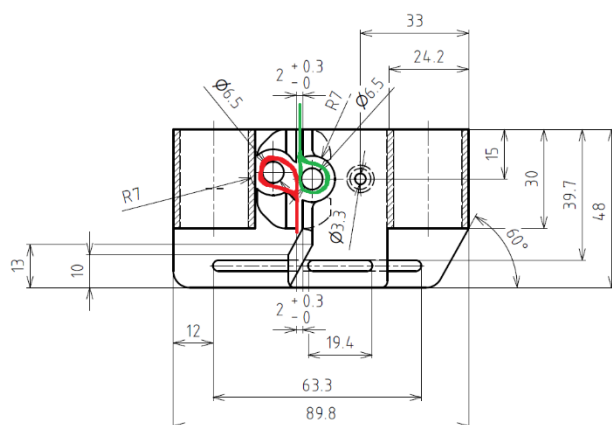


Obr. 16 Pojezd 2

2.8 Pozorovací vozík

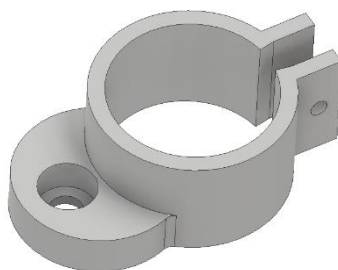
Součást nesoucí kameru byla tou nejsložitější částí celého návrhu. Nachází se nad pozorovacím objektem na dvou rovnoběžných tyčích prostřednictvím lineárních ložisek. Stejný způsob jejich vkládání zajišťuje jednoduchou montáž. Pohyb po ose je zajištěn řemenem GT2. Upnutí spočívá v navlečení konců řemene na válce o průměru 6,5 mm. Po obtočení válce se konce řemene zaseknou svými zuby o vstupující část do upínače. Sražení v místě vkládání napomáhají k hladšímu vsunutí do dvoumilimetrové drážky s tolerancí 0,3 mm. Barevné rozlišení na Obr. 17 znázorňuje umístění opačných konců na vozíku. Aby se zaručil standardní chod v ose Y, musí dojít k dodatečnému napnutí. Napínání probíhá dvěma způsoby. Hlavní napnutí je možné realizovat při nasazování motoru. V první fázi našroubujeme pouze jeden šroub. Následně zašroubováním jednoho ze zbylých dvou šroubů řemen napneme. Dodatečné napnutí lze provést našroubováním kladky nebo řemenice do drážky na vozíku.

Prostor mezi upínačem a ložiskem slouží pro chod paralelního řemene. Kvůli napnutí vznikne přesah řemene s upínačem. Dochází tak k narušení pohybu na ose Y a poškozování samotného řemene. Řešení se nabízelo v podobě externího točivého članku v inkriminovaném místě. Za ten jsem zvolil řemenici navlečenou na šroub M3. V daném prostoru je axiální posuv omezen, ale ne znemožněn.



Obr. 17 Rozměry pozorovacího vozíku s modelem

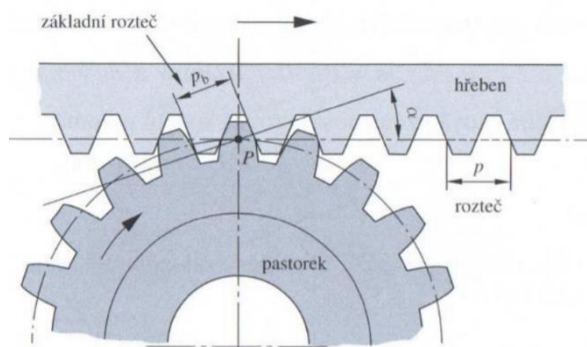
Hlavní funkcí vozíku je reagovat na podněty zaznamenávané z připevněné kamery. Z praktického hlediska nebylo vhodné tisknout pozorovací vozík společně s otvorem pro snímací zařízení. Vytvořena byla objímka na Obr. 18, která sevřela válcovitou část díky šroubu M3 utaženým maticí. K pozorovacímu vozíku přichycena šroubem M6 s maticí.



Obr. 18 Objímka

2.9 Ozubený hřeben

Pohyb na ose X je zprostředkován odvalováním pastorku po hřebeni. Ozubený hřeben lze chápat jako část čelního ozubení se středem v nekonečnu. Rotační pohyb pastorku převádí



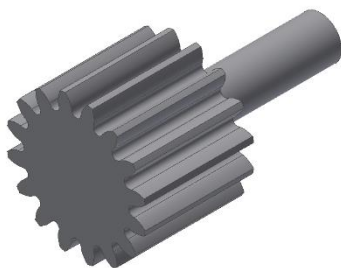
Obr. 19 Popis geometrie odvalování pastorku po hřebeni[12]

celkový pohyb přes ozubený hřeben v translační. Existují hřebeny jak se šikmými, tak s přímými. V ojedinělých případech je možné použít i hřebeny se zuby šnekovými.

Základem správného návrhu bez uvažování korekce je minimální počet zubů na pastorku. Při uvažování mírného podřezání je možné počítat až se čtrnácti zuby, zvláště pokud se jedná o plastové součásti s nízkou mezí únavy. Při nutnosti snížení počtu zubů pod minimální úroveň musí nastat korekce ve výpočtu ozubení. Tím se omezení sníží přibližně na 12 zubů. Problémem může být také špičatost vznikající při dotyku pravé a levé části zubu na hlavové kružnici. [12,13]

Pastorek byl navržen následovně:

- Druh ozubení: čelní s přímými zuby
- Počet zubů: 16 (bez podřezání)
- Korekce ozubení: žádná
- Modul: 2
- Průměr roztečné kružnice: 32 mm
- Šířka: 28 mm
- Materiál: PET-G

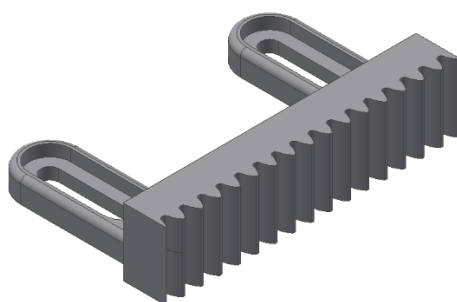


Obr. 20 Pastorek

Pastorek je navlečen na hřídel motoru s minimálním přesahem. V důsledku toho je montáž docela obtížná, ale zaručuje se tím stála poloha pastorku na hřídeli. Vlivem gravitace pastorek vždy klesl na nejnižší možnou polohu. Způsobilo to tření v místě dotyku s platformou a nepříjemný zvuk při pohybu.

Hřeben

- Stejné parametry jako pastorek kromě roztečné kružnice s poloměrem v nekonečnu a šířky 23 mm.
- Počet zubů na jednom hřebeni je 16 (stejný počet s pastorkem je zcela náhodný)

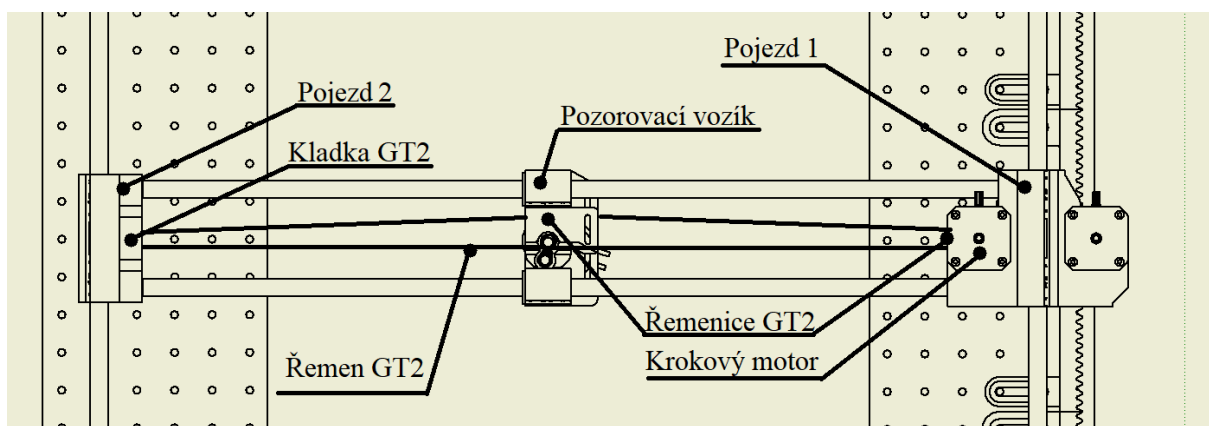


Obr. 21 Ozubený hřeben

Jedná se o případ, kdy je hřeben staticky upevněn k platformě vždy dvěma šrouby M6 a následně je jeho pozice vůči pastorku upravena dle potřeby. Kvůli omezené tiskové ploše musel být hřeben vytisknut po částech se zaručenou návazností ozubení. Pokud by se stalo, že by k návaznosti nedošlo, způsobilo by to trhaný pohyb. Nastalo by také rychlejší opotřebení materiálů obou součástí.

2.10 Soustava s řemenem

Realizace pohybu v ose Y probíhá prostřednictvím synchronního řemene GT2 společně s řemenicí upevněnou na hřídeli krokového motoru a kladkou GT2 na protilehlé straně. Pro provoz osy Y slouží již zmíněný NEMA 17 s přídržným momentem 0,28 Nm. Tato osa není příliš zatěžována jako osa X, tudíž se mohlo přistoupit k redukci krouticího momentu. Řemenice je k motoru jištěna závrtným šroubem M3. Pokud je napnutí řemene dostačující, nedochází k prokluzu řemene na řemenici. Největší odpor řemene vůči pohybu nastává u řemenice umístěné na pozorovacím vozíku. Zde je v průběhu jízdy řemenice vyzdvižena do její nejstabilnější polohy. Dochází ke tření se stěnou pozorovacího vozíku a šroubem, na kterém je řemenice nasazena. Dalšími možnými úpravami by se řemenice mohla nahradit menší kladkou nebo by se v modelu zvětšila výška prostoru pro řemen. Tření v ložiskách je minimalizováno mazáním. [14]



Obr. 22 Návrh řemenového posuvu na ose Y



Obr. 23 Kladka GT2



Obr. 24 Řemenice GT2-20 zubů[32]

2.11 Kamera

Pro sledovací testy byla použita web kamera A4tech PK-910H. S maximálním rozlišením 1920x1080 a třiceti snímků za sekundu je postačující pro vytvoření zpětné vazby v reálném čase. U videa je hodnota rozlišení až 2 MPx. Připojení k počítači realizováno USB 2.0.



Obr. 25 kamera A4tech PK-910H[26]

Tělo kamery obepíná navržená objímka. Kamera je na vozíku umístěna pevně. Utažením matice docílíme stability obrazu. V optimálním režimu pozorování nastavíme kameru tak, že se u horního okraje obrazu nachází soustava hřebenů na vrchní platformě (není vidět na kameře).

3 Realizace 3D tisku

Výroba součástí byla z velké části zastoupena 3D tiskem. V rámci mé bakalářské práce jsem měl možnost pracovat na čtyřech tiskárnách z toho tři se nacházejí na Ústavu přístrojové techniky a jednu, kterou vlastním pro domácí použití. Největší zastoupení dílů na sestavě zařízení má Prusa i3 MK3S+. To činí téměř 90 % ze všech dílů. Důvodem je nejlepší kvalita výtisků a minimální zásahy do prostředí PrusaSlicer v základním nastavení pro tisk. Na tiskárně Zortrax M300 byl proveden výtisk krabičky pro Arduino UNO spojené s CNC shieldem. Kvůli úspoře času jsem využil i menší tiskárnu společnosti Prusa Research – Prusa MINI na tisk pozorovacího vozíku. Má tiskárna je rozebraná v první kapitole bakalářské práce a byl na ni prováděn zkušební tisk. Pro návrh dílů byl použit software Inventor od společnosti Autodesk v rámci její studentské licence.

Tiskárna	Tištěný díl	Materiál	Kusů
Prusa i3 MK3S+	Pojezd 1	PET-G	1
	Pojezd 2	PET-G	1
	Ozubený hřeben	PET-G	7
	Držák tyče	PET-G	4
	Jistící díl	PET-G	4
	Pastorek	PET-G	1
Prusa MINI	Pozorovací vozík	PET-G	1
Zortrax m300	Krabička na elektroniku	ABS	1

Tab. 4 Seznam tištěných dílů

3.1 PET-G

Materiál lze charakterizovat jako tepelně odolný materiál s dobrou houževnatostí. Je proto ideální volbou na tisk mechanických dílů v sestavě. Při tisku se na podložce nekrotí díky nízké teplotní roztažnosti. Vhodná je tedy i výroba větších dílů, které během tisku nezmění svůj požadovaný tvar. Kombinuje vlastnosti konkurenčních PLA a ABS. S PLA mají společný právě způsob bezproblémového tisknutí. PET-G vyniká v jeho mechanických vlastnostech a zaručuje širší použití.

Příprava tisku je následující:

- Tryska nahřátá na 240 °C
- Podložka má teplotu od 80° - 100 °C
- Čistá podložka – nesmí se použít isopropyl alkohol kvůli přílišné přilnavosti
- Nejvhodnější čističe: Okena, Windex [29]

3.2 ABS

Větší nároky na materiál si vyžádala krabička pro elektroniku. Zde jsem se seznámil s tiskárnou od společnosti Zortrax. Ze zkušeností kolegů na ÚPT je na tiskárně vhodný právě tisk z tohoto materiálu. Jiné materiály se v trysce zasekávají a tím způsobují deformované díly. Výběr spočíval v tom, že při provozu zařízení se budiče krokových motorů zahřívají. Tím se i v jejich okolí generuje teplo a jiné plastové díly z jiných materiálů by se mohly začít tavit. ABS se vyznačuje skvělou tepelnou odolností, kdy do 98 °C nedochází k výrazným deformacím. Společně s PLA spadají do kategorie termoplastů. To znamená, že se může opakovaně roztavit

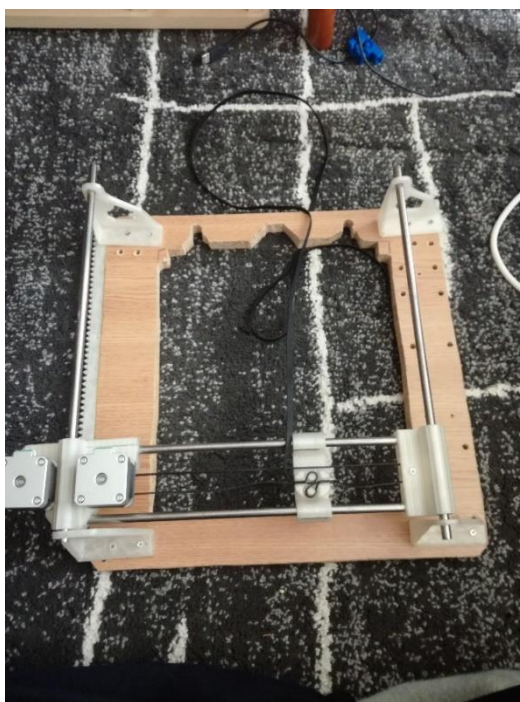
a zase zkrytalizovat, aniž by se znehodnotil. Možná je i úprava povrchu při použití acetonu (jeho výpary). Ten se stává velice hladkým a po aplikování se vrstvy vyhlazují až k nerozeznání.

Příprava tisku:

- Tryska nahřátá na 255 °C
- Podložka má teplotu od 100 °C (při tisku větších objektů 110 °C)
- Pro vyčištění podložky možné využít isopropyl alkohol[29]

3.3 Zkušební tisk

Kvůli vládním opatřením nebylo možné na určitou dobu volně cestovat a byl jsem odkázán na přizpůsobení práce ve svém bydlišti. Využití nové tiskárny v mém vlastnictví bylo vhodným způsobem, jak se realizovat na projektu distančně. Od ÚPT jsem obdržel PET-G transparentní tiskovou strunu. Iniciativa přerostla v návrh zmenšené verze mikroposuvného sledovacího zařízení. Cílem bylo se nejvíce přiblížit budoucí podobě mechanismu.



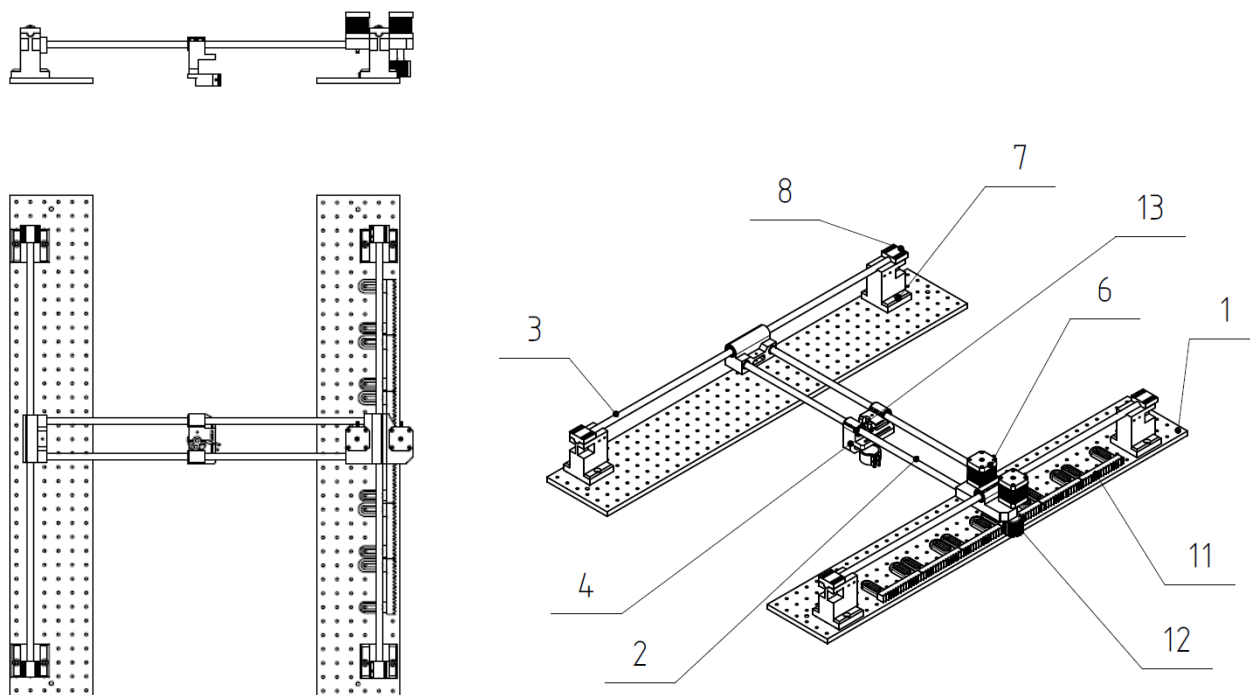
Obr. 26 Zmenšená verze sledovacího systému

Jedná se o dvouosé zařízení s rozměry 250x300 mm. Díly umístěné na dřevěném rámu vyřešily problém se stabilitou. Ozubené hřebeny byly pouze přilepeny na jednu stranu rámu a k nim se doladilo uspořádání ostatních dílů. Provedl se tedy opačný postup než při realizaci výsledného zařízení. V té době ještě nebyl vyřešen problém se snímáním obrazu, takže zmenšený model sloužil především k demonstraci pohybu na obou osách. Stejně bylo osazení motorů, kdy na hlavním pojezdu pracují oba motory Nema 17.

Společně s vývojem mechanismu probíhalo vytvoření programu na detekci pohybu. Jednalo se o nastavení příkazů pro sekvenci pohybů na vývojovou desku Arduino. Bez záznamu obrazu jsem se soustředil na způsob řízení dvou motorů. Ovládání bylo realizováno přes prostředí v Labview. Jednalo se o zadání kroků o kolik se má motor otočit, smyslu otáčení motoru a rychlosti jakou se tam má dostat. Všechny zmíněné věci se podařily uskutečnit s tím,

že jak program v Arduinu, tak v Labview tvořily základy programu pro aplikaci na reálnou detekci pohybu.

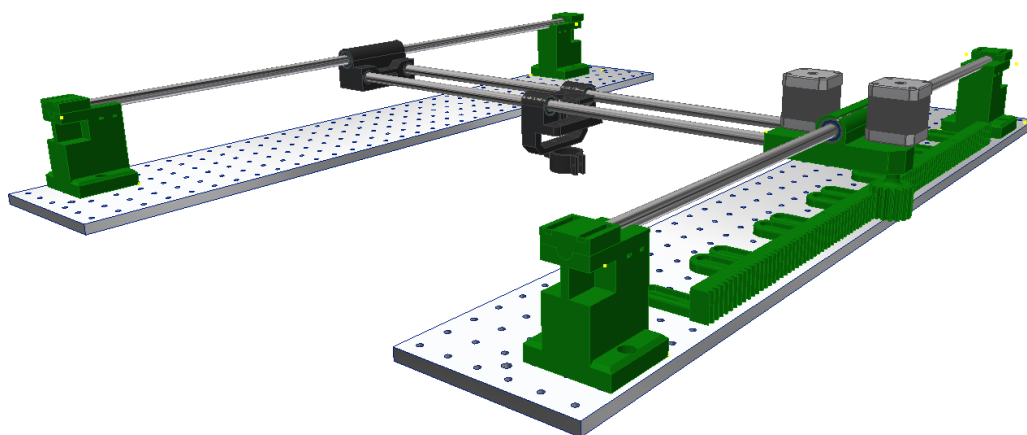
3.4 Finální sestava



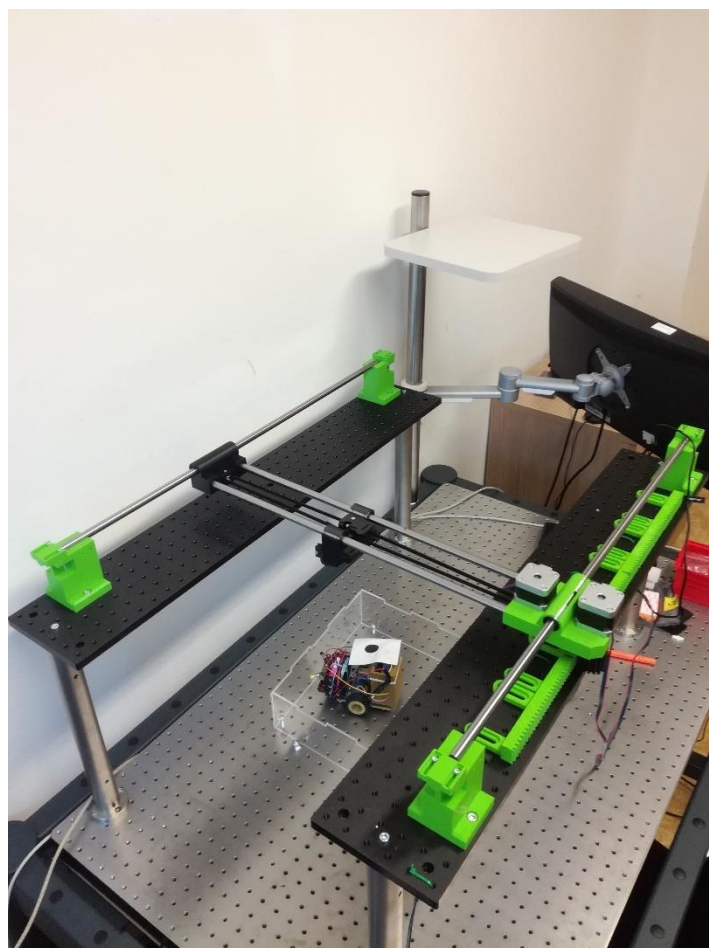
Obr. 27 Výkres horní sestavy

1	2	deska - Thorlabs MB1590/M	3.53 kg
2	2	tyc_600	0.52 kg
3	2	tyc_750	0.66 kg
4	1	vozik_C6	0.09 kg
5	1	drzak_tyce_C41	0.14 kg
6	2	M1173041- NEMA 17	0.64 kg
7	4	pojezd 1	0.18 kg
8	4	jistici_dil	0.01 kg
9	1	pojezd 2	0.09 kg
10	1	objimka_A1	0.01 kg
11	6	ozubený_hreben	0.04 kg
12	1	pastorek	0.03 kg
13	6	LM12UU	0.06 kg
ITEM	QTY	PART NUMBER	HMOTNOST

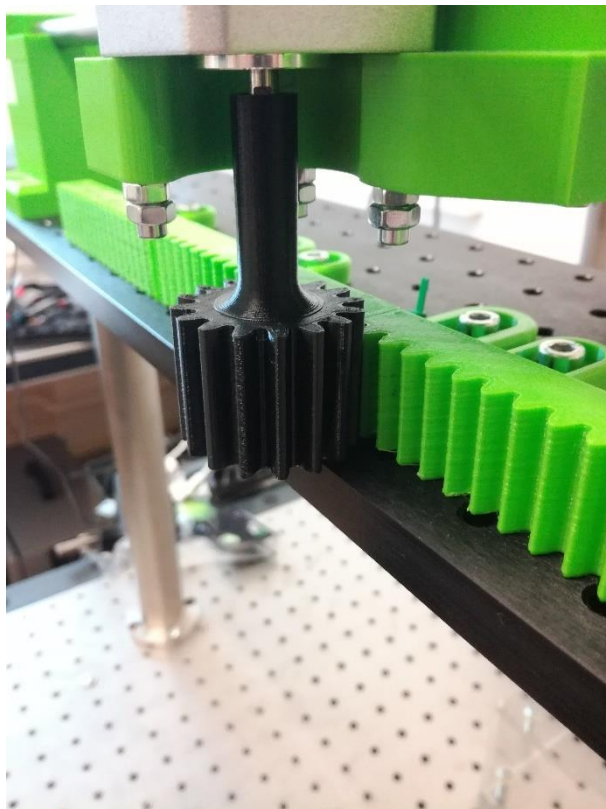
Tab. 5 Kusovník



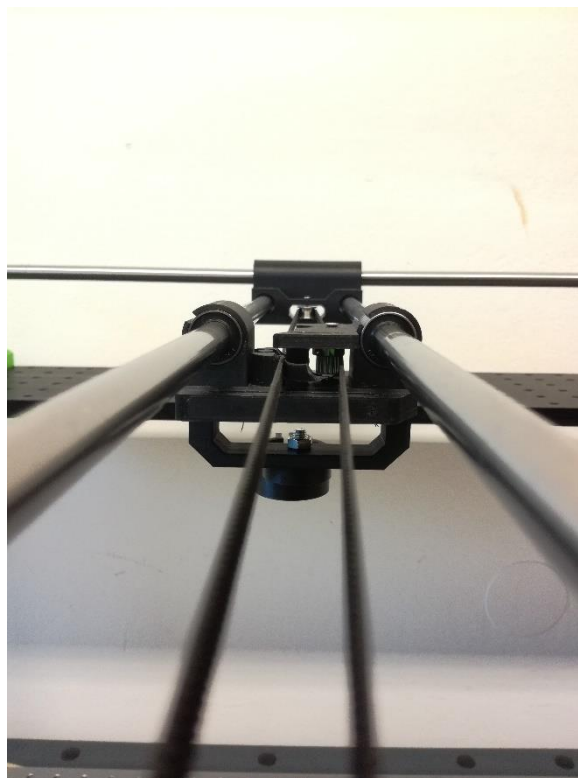
Obr. 28 Model horní sestavy v perspektivě



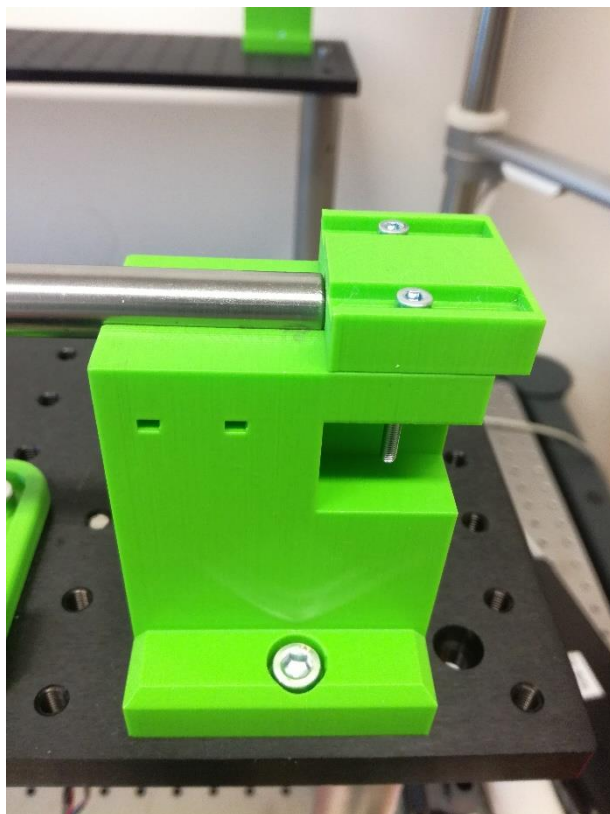
Obr. 29 Reálná sestava



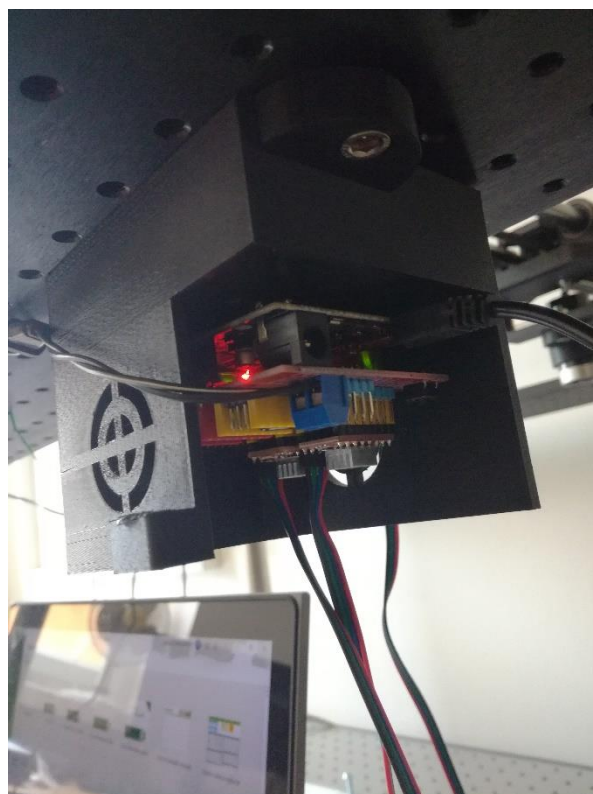
Obr. 30 Pastorek s ozubeným hřebenem



Obr. 31 Lineární vedení na ose Y



Obr. 33 Uložení tyče na držáku



Obr. 32 Umístění vývojové desky Arduino s CNC shieldem

4.1 Program pro Arduino

Pro řízení součástek Arduino je zapotřebí vytvořit vnitřní program, který bude reagovat na pokyny přicházející z Labview. Na začátku programu probíhá určení, jaké funkce mají zastávat jednotlivé piny. Zároveň s nimi se určí rychlost komunikace na sériovém portu. Piny „X_STEP“, „Y_STEP“ stanovují piny řídící počet kroků, které motory musí v cyklu vykonat. „X_DIR“ a „Y_DIR“ se starají o směr chodu motorů.

Inicializační kód v Arduino:

```
#define SERIAL_SPEED 57600
#define PARAMETR_LENGTH 2 // delka parametru - 2 byty je
cislo -32768 az 32767
#define MESSAGE_LENGTH 3 // jeden byte je prikaz typu Command
#define ENABLE 8
#define X_STEP 2
#define X_DIR 5
#define Y_STEP 3
#define Y_DIR 6
#define Z_STEP 4
#define Z_DIR 7
```

Stanovení příkazů umožnilo později v Labview přiřadit jednotlivým činnostem v cyklu, co mají v danou chvíli dělat. Pokud se v příkazovém okénku objeví nápis „STATUS“, program čeká na příchozí informaci. Když proběhne komunikace v pořádku, program vypíše hlášku „OK“ a příkaz se provede. Jednotlivé příkazy jsou označeny od 0 po 5. Hláška „KO“ se ukáže ve chvíli, kdy se něco během procesu nezdařilo a nenavázala se sériová komunikace.

Příkazy:

```
enum Command {
KO = 0, // odpoved neco je spatne
OK = 1, // rozkaz prijaty
STATUS = 2, // mame spojeni?
X_MOVE = 3, // prikaz na pohnuti motoru o X-kroku
TIME_DELAY = 4, // prikaz na casove zpozdeni signalu mezi
sebou
Y_MOVE = 5,
}
```

Výběr, který z příkazů bude poslán do Labview řídí struktura „switch-case“. Pokud si program Labview zavolá příkaz X_MOVE nebo Y_MOVE, rozběhne se funkce motorStep(). Do ní je zapisován parametr stanovující časové mezery mezi impulzy posílané do motorů přes budiče. Nižší hodnoty parametrů znamenají rychlejší střídání impulzů ve stavu „LOW“ a „HIGH“ na pinech určující kroky motorů. Při každé změně stavu se motor otočí o jeden krok či mikro krok v závislosti na nastavení hardwaru. Na začátku nastává zrychlování z velice nízké rychlosti střídání impulzů (nelze z v = 0) na hodnotu danou příkazem „TIME_DELAY“. V ní se setrvá přibližně 67 % z celkové dráhy a následně se opět zpomaluje na nejnižší rychlost shodnou s počáteční.

Kód pro case X_MOVE:

```
void motorStep( short count){  
if (count>= 0)  
digitalWrite(X_DIR,HIGH);  
else  
digitalWrite(X_DIR,LOW);  
for(int i = 0; i < round(abs(count)/6); i++)  
{  
short xtime_a = map(i,0,round(abs(count)/6),1000,time_delay);  
digitalWrite(X_STEP,HIGH);  
delayMicroseconds(xtime_a);  
digitalWrite(X_STEP,LOW);  
delayMicroseconds(xtime_a);  
}  
for(int i = 0; i < round(abs(2*count)/3); i++)  
{  
digitalWrite(X_STEP,HIGH);  
delayMicroseconds(time_delay);  
digitalWrite(X_STEP,LOW);  
delayMicroseconds(time_delay);  
}  
for(int i = 0; i < round(abs(count)/6); i++)  
{  
short xtime_b = map(i,0,round(abs(count)/3),time_delay,1000);  
digitalWrite(X_STEP,HIGH);  
delayMicroseconds(xtime_b);  
digitalWrite(X_STEP,LOW);  
delayMicroseconds(xtime_b);  
}  
}
```

Výsledkem je plynulejší pohyb z bodu A do požadovaného bodu B, menší namáhání plastových dílů (ozubeného hřebene a pastorku) a menší vibrace na ose Y. Navíc se zde počítá i se zápornými hodnotami parametru a určí se směr pohybu.

4.2 Program v Labview

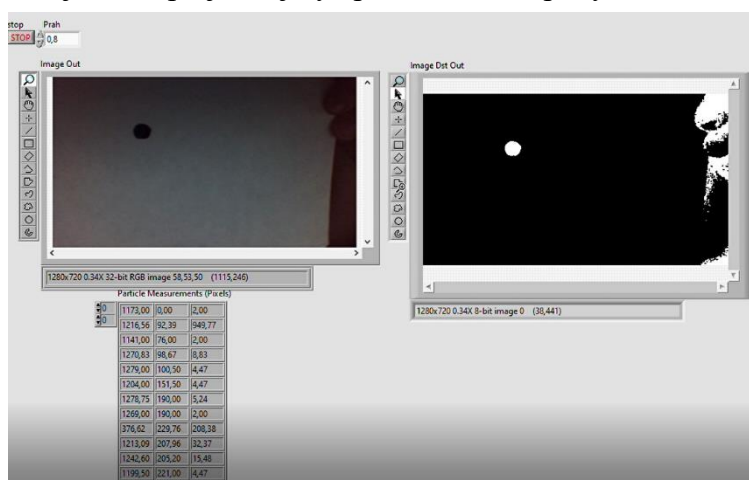
Zde se odehrává zpracování obrazu a následné poslání příkazu do programu Arduino. Jedná se o tři vzájemně propojené while smyčky. První smyčka obstarává vyhodnocení obrazu a nalezení tvaru zadaného do vzoru. Druhá ověřuje aktuální stav na vývojové desce a třetí posílá příkazy na motory.

4.2.1 První návrh

Nalezení správného program bylo klíčovým úkolem celého projektu. Zaměřili jsme se na detekci černého bodu na bílém pozadí. Rozhodli jsme přetvořit barevný obraz na odstíny šedi a každému pixelu přiřadit hodnotu od 0 do 1 podle jeho intenzity. Další úpravou obrazu jsme

získali binární obraz s černou a bílou barvou, který se ještě stal inverzním a úkolem se stalo hledání bílého bodu na černém pozadí. Rozdělení toho, kam se daný pixel přiřadí se dalo ovlivnit ručně zadáním hodnoty ve výše zmíněném intervalu od 0 do 1.

Experimentální zkoušky odhalily nevýhody tohoto přístupu. Docházelo k falešným signálům z ostatních objektů obrazu. Zobrazovaly se hlavy šroubů, závitové díry a součástky mechanické myši. Zavedl se sice ověřovací parametr o počtu pixelů dané barvy, ale jako jediný takový nestačil. Hodnota celkem logicky kolísala v určitém intervalu a nedala se stanovit pouze jedna. Byla také snaha vlézt se do intervalu hodnot, ve kterém by se daný objekt nacházel. Do tohoto intervalu ovšem začaly spadat podobné body, které neměly s tím sledovaným nic společného. Rozhodli jsme se přejít na jiný způsob detekce pohybu.

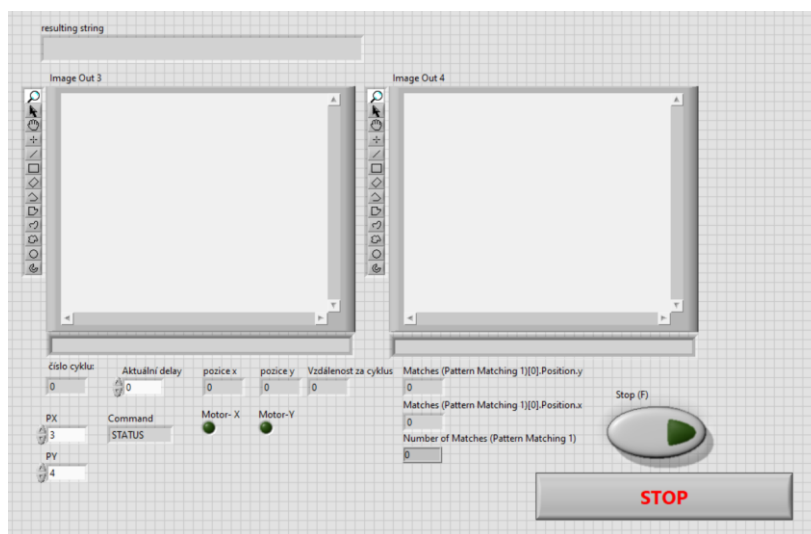


Obr. 35 Detekce černého bodu na bílém pozadí v LabVIEW

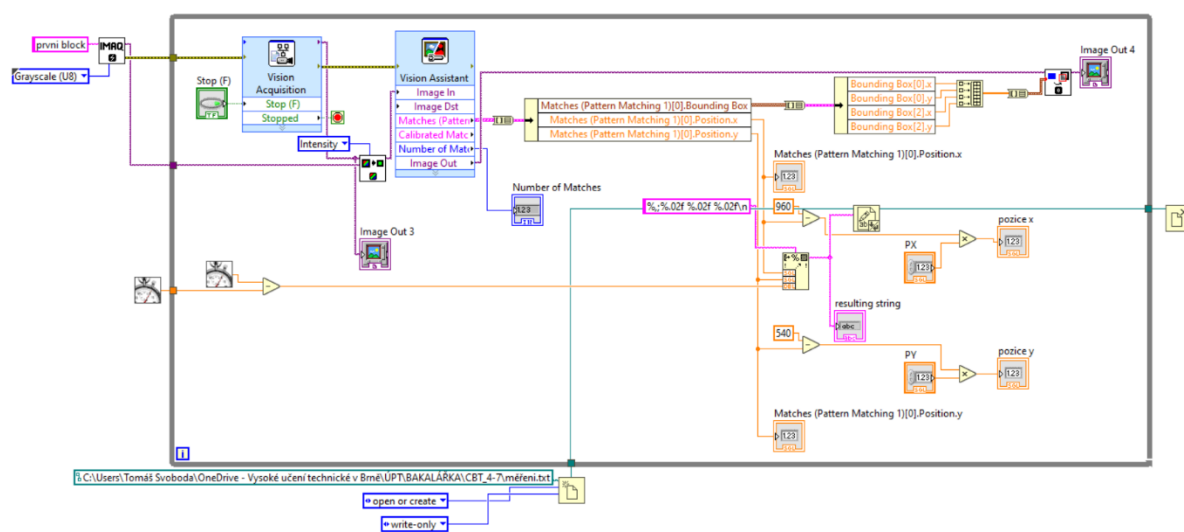
4.2.2 Finální návrh

Nechtěli jsme sledovat bod jen jako soubor počtu pixelů o určité intenzitě, ale zajímal nás i jeho tvar. Zpracování obrazu probíhá v sekci „Vision express“. Video se nahraje skrz blok „Video aquisition“. V dalším bloku se pixely rozřídí podle intenzity a putují do „Video assitant“. Na tomto místě se nahraje objekt, který chceme aktuálně sledovat. V mém případě to byl opět černý bod na bílém pozadí. Aby se podmínky ztížily, tak okolí bodu nebylo jenom čistě bílé. Nacházely se tam i jiné předměty a body, které mohly zdánlivě připomínat bod na papíře. Obraz se v bloku neustále vyhodnocuje, zda se na něm neobjeví zadaný vzor. Najde-li co hledá, označí se bod v programu červeným čtvercem. Aplikace na hledání vzoru se nazývá „pattern matching“.

V blokovém schématu lze z označeného objektu vytáhnout informace o souřadnicích polohy těžiště. Ty jsou posílány do dalšího cyklu, který se zabývá zpracováním informací pro řízení motorů. Předchází ho cyklus ověření, zda je vývojová deska správně připojena. Pokud je předán kontrolní parametr „STATUS“, cyklus řízení motorů je spuštěn. Na základě přenesení lokálních proměnných z prvního cyklu probíhá odesílání polohy do struktury „case“. Vyhodnocuje se, zda se aktuální poloha liší od té minulé. Jestli ano, přeposílá se informace o počtu kroků, které musí motory vykonat. Cyklus se opakuje po dojetí obou motorů o požadovanou hodnotu kroků. Pro testování jsem zadal čekání na další iteraci cyklu v délce 500 μ s. V takovém režimu zařízení stihlo sledovat pomalejšího robota, ale myš by utekla ze záběru. Nicméně ze zaznamenávání dráhy v závislosti na čase bylo více patrné, jak se změněné hodnoty projeví na výsledný pohyb. Hodnotu jsem změnil na 100 μ s.



Obr. 37 Čelní panel pro ovládání sledovacího zařízení v LabVIEW



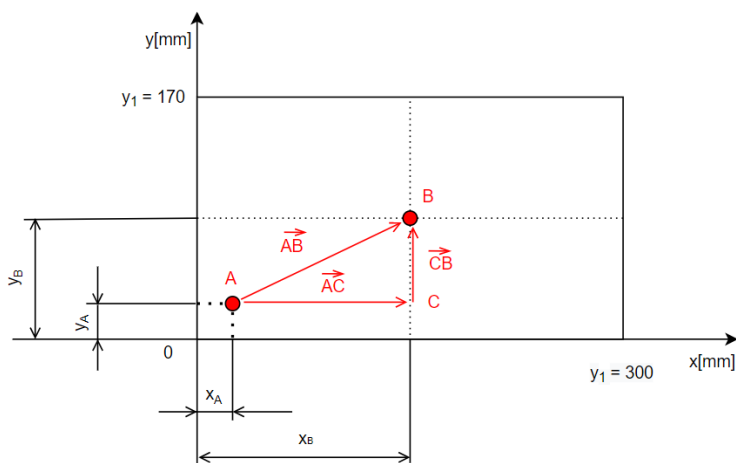
Obr. 36 Blokové schéma pro zpracování obrazů a zachycení souřadnic v LabVIEW

4.3 Experiment s robotickou myší

Pro ověření, zda lze zařízení aplikovat na pozorování objektu byl použit robotický myšák. Jeho autorkou je MVDr. Petra Ondráčková, Ph.D. Robot má uloženou trajektorii získanou trasováním pohybu živého modelu. Pohyb lze charakterizovat jako trhavý, reagující na podněty okolí s náhlými změnami ve směru. Oproti reálné myši je podnětem pouhé naražení do stěny v jeho vymezeném prostoru. Osazen je dvěma unipolárními motory. Každý z nich ovládá jedno z kol robota. Jeho otočení v prostoru je tedy koordinované při současném otáčení obou kol. Jako zdroj napájení využívá 6 tužkových baterií, každé o napětí 1,5 V.

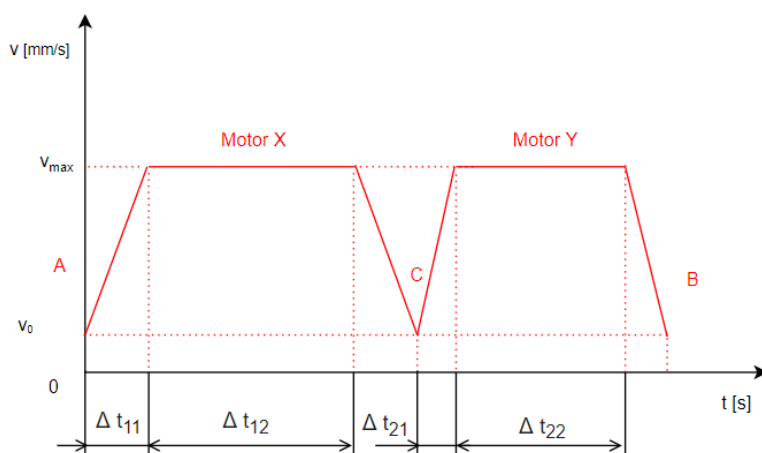
4.3.1 Zaměření bodu z určité vzdálenosti

V tomto experimentu ještě nemusel být robotický myšák použit. Jednalo se o test zaměření nepohyblivého bodu v co nevdálenějším místě viditelném na kameře. Záběr kamery na spodní podložku je 170x300 mm (přibližně). Těžiště pozorovaného bodu neleží přímo v rohu obrazu, protože by se neidentifikoval tvar. Nachází se asi 25 mm od levého okraje a 20 mm od pravého. Úkolem zařízení je dostat těžiště z rohu obrazu do jeho středu.



Obr. 38 Počáteční a koncová pozice bodu

Nejvhodnější přesun z místa A do B je možný podle Obr. 38 Počáteční a koncová pozice bodu. Obr. 38 po dvou na sobě kolmých přímkách reprezentující posuvy na osách X a Y. Tento pohyb lze pozorovat na záznamu z kamery, takže pohyb na osách má opačná znaménka vektorů. Motory jsou řízeny jednotlivě a postupně. Není tedy možný posun po vektoru AB. Graf rychlosti v závislosti na čase při přesunu je na Obr. 39. V první řadě je poháněn motor na ose X a až po něm následuje druhý motor. Čím je dráha dojezdu menší, tím se snižuje i doba zrychlování. Obecně je zadáno, že zrychlování i zpomalování trvá jednu šestinu vzdálenosti dráhy dojezdu. V praxi je docela obtížné dosáhnout takovéto přesnosti dojezdu. Můžeme se ji přiblížit na co nejmenší počet dojezdových přímek.



Obr. 39 Závislost rychlosti na čase při přesunu z místa A do B

K tomu abych dosáhl co největší přesnosti dojezdů jsem zvolil PID regulaci. Vzal jsem si z ní pouze P – regulátor a přiřadil ho ke každému motoru zvlášť. Regulován byl počet kroků, který je potřeba uskutečnit k dosažení požadovaného bodu.

Proces, který probíhal byl následující:

Z kamery přicházejí neustále hodnoty o poloze těžiště bodu. Vzhledem k natočení kamery o 180° vůči pozorovateli u zařízení musí proběhnout přepočtení polohy. Střed obrazu kamery odpovídá v pixelech bodu o souřadnicích [960;540]. Odečtením souřadnice hledaného bodu těžiště od X-ové hodnoty středu na kameře dostaneme vzdálenost pro posuv osy X. U osy Y odečítáme od souřadnice na téže ose střed obrazu kamery. Výsledkem jsou dvě hodnoty, které řeknou o kolik pixelů se má daný motor posunout. Pixely ovšem neodpovídají reálným posuvům na osách a je nutné je začít regulovat. Pro regulaci byly zvoleny hodnoty 0,5;2;3;4,5 a 6.

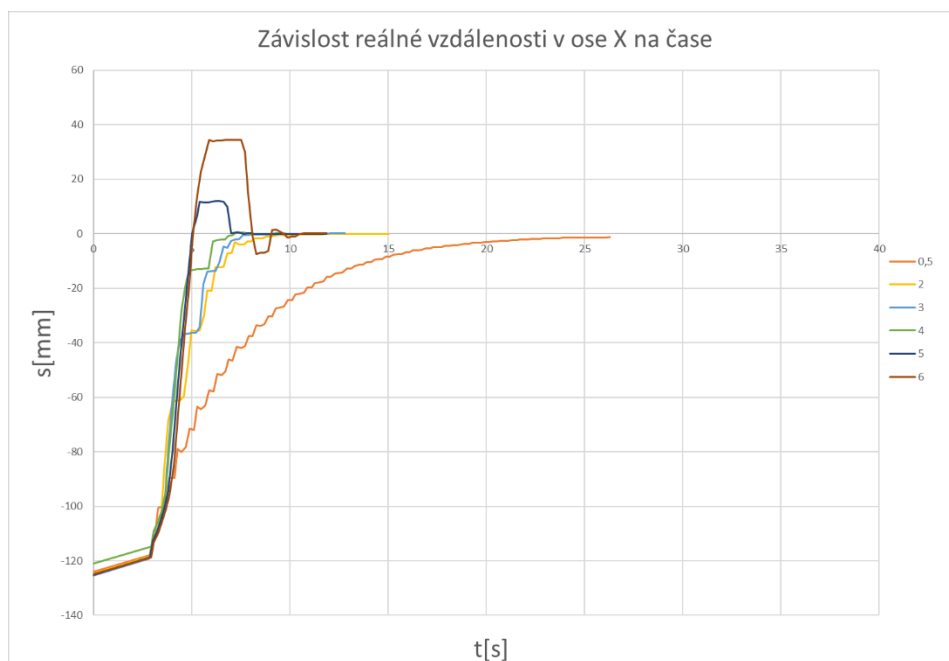
Před experimenty byl přepočten 1px na mm podle vzorce:

$$l_{px} = \frac{l_1}{l_0} [mm] \quad (4.1)$$

Kde l_{px} je délka jednoho pixelu na pracovní ploše, l_0 rozlišení kamery v pixelech na jedné ose, l_1 délka záběru v jedné ose na pracovní ploše. Pro osu Y vyšlo 0,1574 mm a osu X 0,1563 mm. Průměrná hodnota vychází na 0,1569 mm.

Díky znalosti vzorce (2.7) bylo možné spočítat teoreticky nejvhodnější P-regulátor podle vzorce:

$$P = \frac{l_{px}}{l_{KR}} \quad (4.2)$$

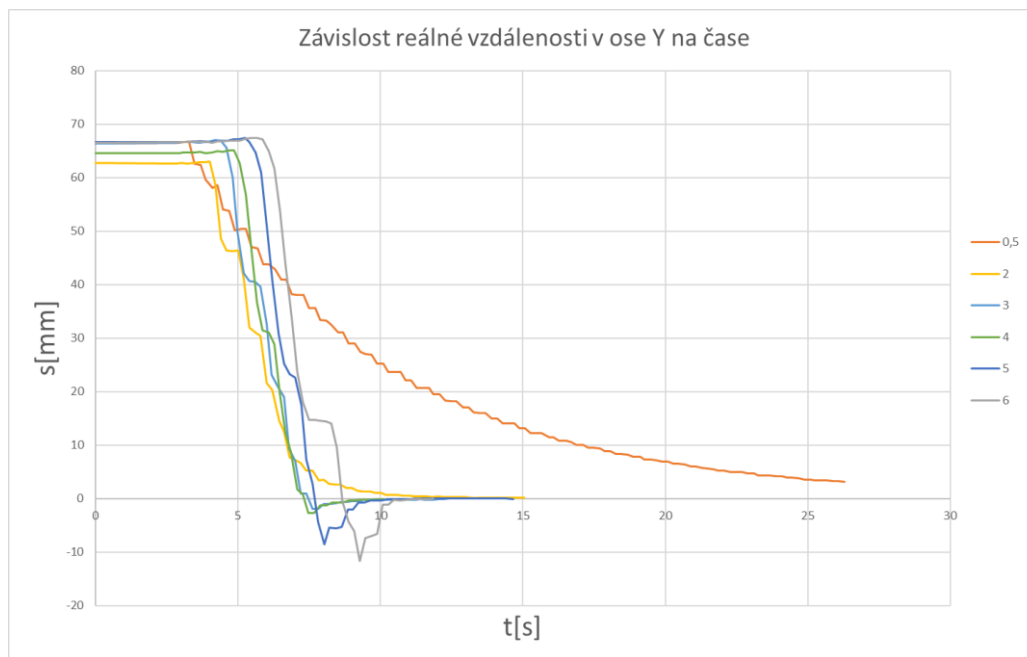


Obr. 40 Závislost reálné vzdálenosti bodu od středu v ose X na čase

Z toho plyne že pro osu X je nejvhodnější teoretický P-regulátor 4,99 a pro osu Y je to hodnota 8,24. Cílem testu bylo zjistit jaký regulátor se hodí při reálném použití.

Podmínky testování jsou následující:

- Hodnota „delay_time“ nastavena na 190 μ s
- Doba, po kterou program čeká na další cyklus je 500 μ s
- Bod je nehybný a nachází se ve vzdálenosti přibližně 140 mm od středu kamery vzdušnou čarou (124 mm na ose X, 65 mm na ose Y)

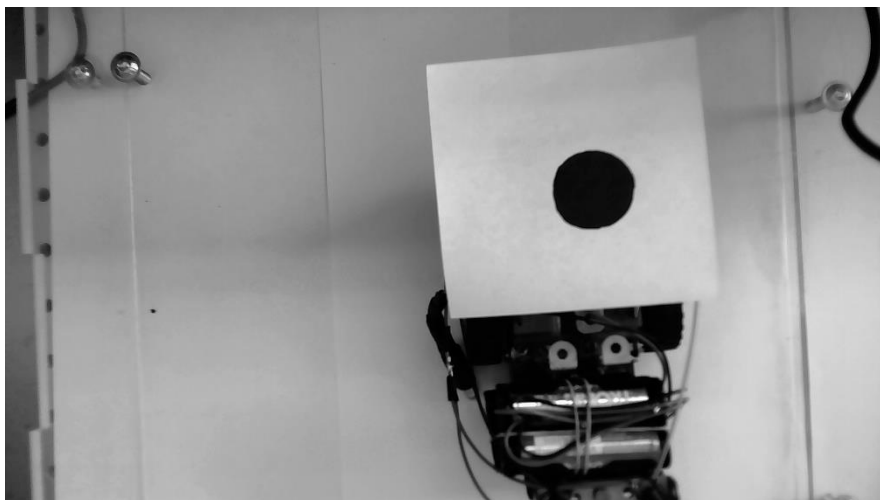


Obr. 41 Závislost reálné vzdálenosti bodu od středu v ose Y na čase

Na začátku zahájení komunikace mezi LabVIEW a Arduinem proběhne kladný posun ve směru osy X. Následuje postupné přibližování při každé změně P-regulátoru. Na ose X je patrné, že ideální regulace bude mezi charakteristikami $P=4$ a $P=5$. Osa Y už není tak očividná. Při hodnotě $P=6$ nedojde ještě k úplnému přiblížení bodu na střed této osy (v jedné dojezdové přímce), ale vzápětí se ocitne na opačné straně přibližování. Pokus jsem několikrát zopakoval a kamera pokaždé místo bodu přejede. Důvodem může být pozdější dodání informace do druhého cyklu motoru. Z toho důvodu je vhodnější volit menší P-regulátor, než vyšel z teoretického předpokladu.

4.3.2 Sledování robotické myši ve vymezeném prostoru

Zde jsem se zaměřil už na sledování pohyblivého tělesa. Pro jednodušší rozpoznání polohy se vycházelo ze stejné myšlenky jako v předchozím pokusu. Robotická myš má na sobě přilepený papírek s černým bodem. Detekování bodu je pro zpracování obrazu jednodušší než zaměřování složitějších tvarů. Navíc se může stát, že dojde k určení více bodů, kde by se takovýto tvar mohl vyskytnout. Klíčová byla přesnost s jakou docházelo k zaměřování.



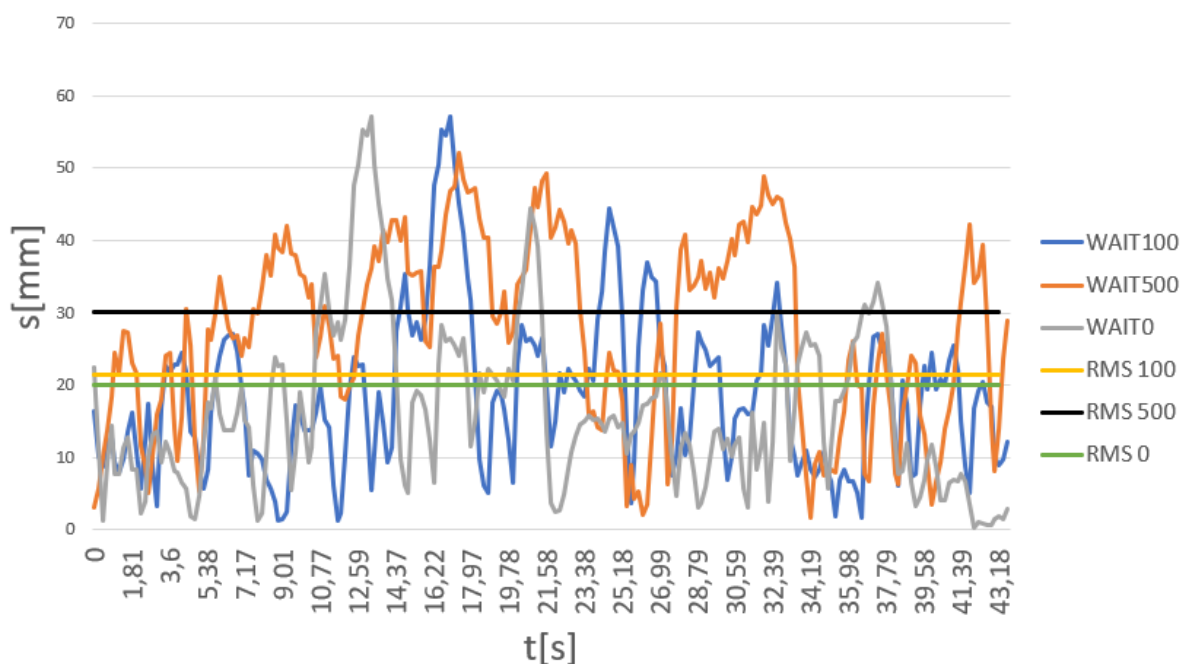
Obr. 42 Obrázek ze záznamu kamery převedený do odstínů šedi (podle intenzity)

Podmínky experimentu:

- Myš má omezený pohyb ze všech stran v rozmezí 300x300 mm
- Kamera v době zapnutí umístěna nad robotem
- P-regulátor pro X na 4 pro Y na 3.

Myš se ve svém prostoru pohybuje zcela volně, dle uložené trajektorie. Na přední straně má umístěné dva spínače. Při sepnutí myš couvne a hledá směr do volného prostoru. Pro porovnání jsem měnil hodnotu časové konstanty určující cyklus s motory.

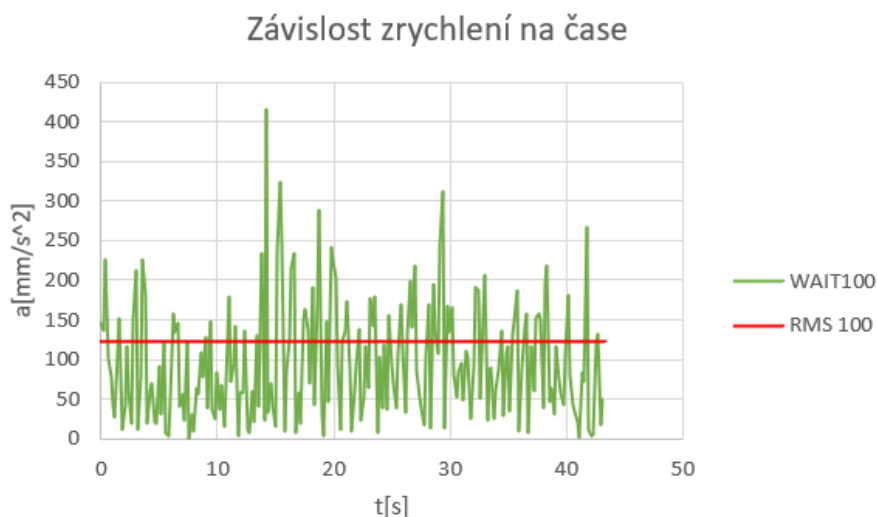
Změna přímé vzdálenosti na čase



Obr. 43 Závislost změny přímé vzdálenosti na čase



Obr. 45 Závislost okamžité rychlosti na čase pro čekací konstantu 100 μ s



Obr. 44 Závislost zrychlení na čase pro čekací konstantu 100 μ s

Čas čekání na pokyn pro motory jsem měnil ve třech stupních. První měření s 500 μ s, druhé se 100 μ s a třetí s nulovou časovou konstantou. Jednotlivé prodlevy se projeví na rychlosti reakce na změnu pohybu. Výsledný graf (obr.43) zobrazuje výchylky poloměru od sledovaného bodu na myši. V grafu jsou pro každý experiment znázorněny přímky efektivních hodnot pro dané pozorování.

Hodnoty jsou následující:

- 500 μ s - 30,13 mm
- 100 μ s – 21,46 mm
- 0 μ s – 19,94 mm

Mezi čekací konstantou 0 μ s a 100 μ s je vidět minimální rozdíl. Při použití nenulové časové konstanty je docíleno menších vibrací v konstrukci. Proto jsem pro další rozbor zvolil experiment s časovou konstantou 100 μ s. Na obr. 44 se nachází průběh okamžité rychlosti v závislosti na čase experimentu. Efektivní hodnota (RMS) v tomto případě činí 41,97 mm/s.

Pro druhý graf znázorňující zrychlení za čas se efektivní hodnota dostala na $121,82 \text{ mm/s}^2$. Experimentálně zjištěná maximální rychlost je $96,19 \text{ mm/s}$ a zrychlení $416,38 \text{ mm/s}^2$.

Za úspěch experimentu bych považoval hlavně to, že myš neutekla při pozorování ze záběru. Stalo by se tak ve chvíli, kdyby bod opustil zorné pole kamery s rozlišením $170 \times 300 \text{ mm}$ na sledovanou plochu.



Obr. 46 Robotická myš umístěná ve vymezeném prostoru pro sledování

5 Zhodnocení a diskuse

Experimentální odzkoušení návrhu zařízení ukázalo, že je schopné sledovat pohyblivý objekt nepřetržitě. Otázkou však zůstává, jestli je možné používat zařízení i po delší časový úsek. Hlavním problémem v tomto případě by bylo přehřívání budičů krokových motorů. Řešením je vytvoření chlazení napájené 12 V přes připojení do CNC shieldu. Použití chlazení desek je běžnou součástí mikroposuvných zařízení. Teplota samotných motorů v čase používání také roste, ale pokud je dodávaný proud správně nastaven, není důvod ke zvýšeným obavám. Dalším přínosným vylepšením by bylo nainstalování závor na obě osy pro případ, že si program pro detekci pohybu vybere objekt mimo vymezené pole. Dojde pak k zamezení pohybu a zničení součástek na zařízení. Změna těžiště pozorovaného bodu je detekována při změně polohy o 1 px. To odpovídá přibližně přesnosti na 0,1569 mm na sledovanou plochu. Tab. 6 popisuje hlavní charakteristiky mikroposuvného sledovacího zařízení.

Charakteristika	Hodnota	Popis
Rozsah posuvů	320(Y)x590(X) mm	
Jmenovitý proud NEMA 17 0,28 Nm	1,3 A	Podle výrobce
Jmenovitý proud NEMA 17 0,44 Nm	1,7 A	Podle výrobce
Napájení desky Arduino	5–7 V (doporučeno)	z počítače přes USB
Napájení CNC shieldu	12 V	přes adaptér
Průměr řemenice (v místě obtočení řemene)	9,7 mm	
Kinematika		
Efektivní hodnota rychlosti	41,97mm/s	experimentálně
Efektivní hodnota zrychlení	121,82 mm/s ²	experimentálně
Maximální rychlost na ose X	165,4 mm/s	výpočtem
Maximální rychlost na ose Y	100,3 mm/s	výpočtem
Maximální celková rychlost	96,19 mm/s	experimentálně
Maximální zrychlení	416,38 mm/s ²	experimentálně

Tab. 6 Charakteristika zařízení

6 Závěr

V souladu s definovanými cíli bakalářské práce jsem:

1. Provedl rešerši mikroposuvných zařízení a zvolil vhodný způsob řízení na osách.
2. Navrhl a popsal sestavu mikroposuvného sledovacího zařízení z komerčně dostupných dílů a zakomponoval do ní i své navržené díly vyrobené na 3D tiskárně.
3. Sestavil aparaturu dle návrhu a připravil program na sledování objektu pomocí programů LabVIEW a Arduino.
4. Zařízení experimentálně otestoval na robotické myši a následně pomocí dat a výpočtů charakterizoval zařízení z hlediska jeho rozsahu, rychlosti a přesnosti pohybu.

Důležitou fází bakalářské práce bylo otestovat, zda zařízení dokáže sledovat pohyblivý objekt. Při experimentech na robotické myši se ukázalo, že navržené mikroposuvné sledovací zařízení svou funkci plní. Myš byla neustále sledována a ani při jediném experimentu se nedostala ze záběru kamery.

Pro dokonalejší podmínky sledování myši je možné zkrátit dobu cyklu detekce bodu použitím rychlejší kamery. Plynulejšího pohybu lze dosáhnout změnou programu v Arduinu pro zrychlování a zpomalování na dané vzdálenosti. Na paralelní ose X by se mohl přidat další motor, aby se zamezilo nadměrným vibracím. Rotační platforma v místě sledovacího vozíku by umožnila snímat otáčení hlavy myši.

7 Seznam použitých zdrojů

- [1] COLLINS, Danielle. What is microstepping? In: *Linearmotiontips* [online]. 21.11.2017 [cit. 2021-03-18]. Dostupné z: <https://www.linearmotiontips.com/microstepping-basics/>
- [2] SNIKHOVSKA, Kseniia. The different types of 3D printing technology. In: *Penandplastic* [online]. 22.12. 2020 [cit. 2021-03-18]. Dostupné z: <https://penandplastic.com/3d-printer-types/>
- [3] WEISS, Benjamin M. Closed-Loop Control of a 3 D Printer Gantry. Seattle, 2014. Master's thesis. University of Washington. Vedoucí práce Duane Storti.
- [4] SCHNEIDEREIT, Dominik, Larissa KRAUS, Jochen C. MEIER, Oliver FRIEDRICH a Daniel F. GILBERT. Step-by-step guide to building an inexpensive 3D printed motorized positioning stage for automated high-content screening microscopy. *Biosensors and Bioelectronics*. 2017, 92, 472-481. ISSN 09565663. Dostupné z: doi:10.1016/j.bios.2016.10.078
- [5] ROSADO, Luís, João OLIVEIRA, Maria João M. VASCONCELOS, José M. Correia da COSTA, Dirk ELIAS a Jaime S. CARDOSO. μ SmartScope: 3D-printed Smartphone Microscope with Motorized Automated Stage. In: *Proceedings of the 10th International Joint Conference on Biomedical Engineering Systems and Technologies*. SCITEPRESS - Science and Technology Publications, 2017, 2017, s. 38-48. ISBN 978-989-758-216-5. Dostupné z: doi:10.5220/0006155800380048.
- [6] Ender 3 3D printer. In: *Creality 3D* [online]. 2021 [cit. 2021-03-30]. Dostupné z: <https://www.creality3dofficial.com/products/official-creality-ender-3-3d-printer>
- [7] Guide: How to Install Stepper Motor Dampers (Ender-3). In: *Let's print 3D* [online]. [cit. 2021-03-30]. Dostupné z: <https://letsprint3d.net/how-to-install-stepper-motor-dampers-ender-3/>
- [8] Thorlabs: *Optical Breadboards with Sealed Holes, Optimized Damping, 60 mm (2.4") Thick* [online]. 1999-2021 [cit. 2021-5-8]. Dostupné z: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=7164&pn=B75120L
- [9] *Rady a informace: Význam tlumení vibrací* [online]. [cit. 2021-5-7]. Dostupné z: <https://www.mit-laser.cz/opticke-stoly>
- [10] Thorlabs: *Ø1.5" Post Basics* [online]. 1999-2021 [cit. 2021-5-8]. Dostupné z: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=1313&pn=P14
- [11] Thorlabs: *MB1590/M - Aluminum Breadboard, 150 mm x 900 mm x 12.7 mm, M6 Taps* [online]. 1999-2021 [cit. 2021-5-8]. Dostupné z: <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=MB1590/M>
- [12] SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS, VLK, Miloš, ed. *Konstruování strojních součástí*. V Brně: VUTIUUM, 2010. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-802-1426-290.
- [13] MALÁSEK, P. Náhon posuvové souřadnice portálového obráběcího centra pomocí pastorku a hřebene. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 96s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Jiří Marek, Dr..

- [14] CHALOUPKA, M. Konstrukce 3D tiskárny pro tisk materiálu s příměsí karbonových vláken. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 98 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Pavlík, Ph.D.
- [15] PWC The road ahead for 3-D printers [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.pwc.com/us/en/technology-forecast/2014/3dprinting/features/future-3d-printing.html>
- [16] Root CNC: Root 3 CNC - 3D Printed CNC Machine [online]. 2017 [cit. 2021-5-8]. Dostupné z: <https://rootcnc.com/machines/root-3/>
- [17] Root CNC: Root 2 [online]. 2017 [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: <https://rootcnc.com/machines/root-2/>
- [18] Root CNC: Comparison Table [online]. 2016 [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: <https://rootcnc.com/>
- [19] HIWIN: Úzký vozík MGN [online]. [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: https://www.hiwin.cz/cz/produkty/linearni-vedeni/miniurni-vedeni/236_uzky-vozik-mgn
- [20] A4988 Stepper Motor Driver Carrier Board: Usage [online]. 2013 [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: https://www.geeetech.com/wiki/index.php/A4988_Stepper_Motor_Driver_Carrier_Board
- [21] Osoyoo: Arduino UNO + Arduino CNC Shield V3.0+A4988 Installation Guide [online]. 2017 [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: <https://osoyoo.com/2017/04/07/arduino-uno-cnc-shield-v3-0-a4988/>
- [22] EUFACTORY: KROKOVÝ MOTOR - ZPŮSOBY ZAPOJENÍ [online]. 20.7.2018 [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: https://shop.eufactory.com/blog/14_krokove-motory-zapojeni
- [23] Hejný, Václav. Řídicí jednotka pro ovládání tří bipolárních krokových motorů. Praha, 2017. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, katedra mikroelektroniky. Vedoucí práce Ing. Teplý Tomáš
- [24] GMelectronic: Vývojový kit Arduino Uno R3 - klon [online]. [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/klon-arduino-uno-r3-atmega328p-ch340-mini-usb>
- [25] Nejen Arduino: Flash paměť [online]. 21. 7. 2019 [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: <https://nejenarduino.cz/flash-pamet/>
- [26] Pololu: Current limiting [online]. [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: <https://www.pololu.com/product/1182>
- [27] Alza.cz: A4tech PK-910H Full HD WebCam [online]. [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: <https://www.alza.cz/a4tech-pk-910h-full-hd-webcam-d370601.htm>
- [28] Einstronic: Stepper motor nema 17 [online]. 2017. [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://iarduino.ru/lib/b160a93c50177047e19d128f96fbb1bb.pdf>
- [29] Prusa3D: PRŮVODCE MATERIÁLY [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/materialy/>
- [30] Infotrend: CNC shield Arduino, zapojení , ladění [online]. 8.2015 [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: <http://www.infotrend.cz/home/cnc-shield-arduino-zapojeni-ladeni/>
- [31] VIPM: LabVIEW Interface for Arduino by NI - Toolkit for LabVIEW Download [online]. 19.5.2016 [cit. 2021-5-14]. Dostupné z:

- https://www.vipm.io/package/national_instruments_lib_labview_interface_for_arduino/
- [32] *Material pro 3D* [online]. [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: https://www.materialpro3d.cz/mechanicke-dily/remenice-gt2-20-zubu/?gclid=Cj0KCQjw4v2EBhCtARIsACan3nxemnGAYmUEXtBKuxAZb9ZvF7HXunRH-5OWRYu-Cb4wFFL7_1BNeiIaAtpvEALw_wcB
- [33] *3DINSIDER: The 9 Different Types of 3D Printers* [online]. [cit. 2021-5-19]. Dostupné z: <https://3dinsider.com/3d-printer-types/>
- [34] *Nejenarduino: EEPROM* [online]. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://nejenarduino.cz/EEPROM/>

8 Seznam obrázků

Obr. 1 Tiskárna Ender 3	15
Obr. 2 Rozdělení tiskáren podle souřadnicového systému[16].....	15
Obr. 3 Napínání řemene přes kladku (osa X)[7]	16
Obr. 4 Creality 3D V1.1.4.....	17
Obr. 5 Root 3 CNC[16].....	18
Obr. 6 Root 2 CNC[17].....	18
Obr. 7 Lineární vedení HIWIN [19]	22
Obr. 8 ložisko LM12UU	23
Obr. 9 Schéma zapojení vodičů na cívky v krokových motorech[22]	24
Obr. 10 Vývojový kit Arduino UNO[24].....	25
Obr. 11 Rozložení pinů na CNC shieldu[22]	26
Obr. 12 zapojení driveru A4988[22].....	27
Obr. 13 Rozměry držáku tyčí s modelem.....	28
Obr. 14 Jistící díl	28
Obr. 15 Rozměry pojezdu 1 s modelem.....	29
Obr. 16 Pojezd 2.....	30
Obr. 17 Rozměry pozorovacího vozíku s modelem.....	31
Obr. 18 Objímka	31
Obr. 19 Popis geometrie odvalování pastorku po hřebeni[12]	31
Obr. 20 Pastorek.....	32
Obr. 21 Ozubený hřeben	33
Obr. 22 Návrh řemenového posuvu na ose Y	33
Obr. 23 Kladka GT2.....	34
Obr. 24 Řemenice GT2-20 zubů[32]	34
Obr. 25 kamera A4tech PK-910H[27]	34
Obr. 26 Zmenšená verze sledovacího systému	36
Obr. 27 Výkres horní sestavy	37
Obr. 28 Model horní sestavy v perspektivě	38
Obr. 29 Reálná sestava	38
Obr. 30 Pastorek s ozubeným hřebenem.....	39
Obr. 31 Lineární vedení na ose Y	39
Obr. 32 Umístění vývojové desky Arduino s CNC shieldem	40
Obr. 33 Uložení tyče na držáku.....	40
Obr. 34 Vývojový diagram detekce pohybu-vytvořeno v Drawio.....	41
Obr. 35 Detekce černého bodu na bílém pozadí v LabVIEW.....	44
Obr. 36 Blokové schéma pro zpracování obrazů a zachycení souřadnic v LabVIEW ...	45
Obr. 37 Čelní panel pro ovládání sledovacího zařízení v LabVIEW.....	45
Obr. 38 Počáteční a koncová pozice bodu	46
Obr. 39 Závislost rychlosti na čase při přesunu z místa A do B	46
Obr. 40 Závislost reálné vzdálenosti bodu od středu v ose X na čase	47
Obr. 41 Závislost reálné vzdálenosti bodu od středu v ose Y na čase	48
Obr. 42 Obraz ze záznamu kamery převedený do odstínů šedi (podle intenzity).....	49
Obr. 43 Závislost změny přímé vzdálenosti na čase	49
Obr. 44 Závislost okamžité rychlosti na čase pro čekací konstantu 100μs.....	50
Obr. 45 Závislost zrychlení na čase pro čekací konstantu 100μs	50
Obr. 46 Robotická myš umístěná ve vymezeném prostoru pro sledování	51

9 Seznam použitých zkratk

Zkratka	Popis
2D	Dvoudimenzionální
3D	Třidimenzionální
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
B	Indukce
CNC	Počítačem řízený obráběcí stroj z angl. <i>Computer numerical control</i>
DC	Jednosměrný proud z angl. <i>Direct current</i>
DLP	Digitální zpracování světla <i>Digital Light Processing</i>
EBM	Digitální tavení paprskem z angl. <i>Digital Beam melting</i>
EEPROM	Elektricky vymazatelná paměť pouze pro čtení z angl. <i>Electrically erasable programmable read-only memory</i>
F	Síla
FDM	Tisk z roztavených termoplastů
I	Proud
k	Bezpečnost
LOM	Výroba laminovaných předmětů z angl. <i>Laminated object manufacturing</i>
PET-G	Polyethylentereftalát-glykol
PWM	Regulace šířky pulzu z angl. <i>Pulse width modulation</i>
R_{CS}	Odpor
R_e	Mez kluzu
RMS	Efektivní hodnota z angl. <i>Root mean square</i>
SLA	Stereolitografie
SLM	Selektivní laserové tavení z angl. <i>Selective laser melting</i>
SLS	Selektivní laserové slinování z angl. <i>Selective lasers Sintering</i>
SRAM	Statická paměť z angl. <i>Static Random acces memory</i>
U_{REF}	Referenční hodnota napětí
W_0	Modul pružnosti v ohybu
σ_0	Nominální napětí v ohybu

10 Seznam tabulek

Tab. 1 Srovnání verzí Root 2 a Root 3[18]	19
Tab. 2 Seznam použitých dílů	20
Tab. 3 Způsoby mikrokrokování	27
Tab. 4 Seznam tištěných dílů	35
Tab. 5 Kusovník	37
Tab. 6 Charakteristika zařízení	52

11 Seznam příloh

Přílohy obsahují výkresovou dokumentaci dílů tištěných na 3D tiskárně, které jsou níže vypsány podle přiřazených čísel výkresu. Dále se v příloze nachází programy z Arduina a LabVIEW.

Číslo	Popis	Formát
1	Ozubení hřeben	A3
2	Pojezd 1	A3
3	Pojezd 2	A3
4	Objímka	A4
5	Držák tyče	A3
6	Jistící díl	A4
7	Pozorovací vozík	A3
8	Držák tyče	A3
9	Obal pro Aarduino	A3
10	Horní sestava	A3